



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Sander Kaasik

**HARILIKU KUUSE (*Picea abies* (L.) Karst.) JA KASE (*Betula*
spp.) RAIEJÄÄTMETE KUI KÜTUSE OMADUSTE
MUUTUSED LADUSTAMISEL**

**EFFECTS OF STORING ON THE PROPERTIES OF NORWAY
SPRUCE (*Picea abies* (L.) Karst.) AND BIRCH (*Betula* spp.)
FOREST RESIDUES FOR FUEL**

Magistritöö
Metsatööstuse õppekava

Juhendajad: teadur Allar Padari, *MSc*
lektor Risto Mitt, *MSc*

Tartu 2018

| | | | |
|---|---------------|--|------------|
| Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Sander Kaasik | | Õppekava: Metsatööstus | |
| Pealkiri: Hariliku kuuse (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) ja kase (<i>Betula</i> spp.) raiejäätmete kui kütuse omaduste muutused ladustamisel | | | |
| Lehekülgi: 57 | Jooniseid: 27 | Tabeleid: 16 | Lisasid: - |
| Õppetool: | | Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetool | |
| ETIS-e teadusvaldkond: | | 1.5. Metsandusteadus | |
| CERC S-i kood: | | B430 Metsakasvatus, metsandus, metsandustehnoloogia | |
| Juhendajad: | | teadur Allar Padari <i>MSc</i> ja lektor Risto Mitt <i>MSc</i> | |
| Kaitsmiskoht ja aasta: | | Tartu, 2018 | |
| <p>Raiejäätmete ladustamise käigus puidu omadused muutuvad. Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks oli uurida, kuidas muutub ladustamise perioodi jooksul hakkpuidu kuivmass ja energiasisaldus. Lisaks uuriti veel ka teiste omaduste nagu tuhasisaldus, kütteväärtus, diameetri kahanemine ja niiskus muutusi.</p> <p>Töö jaoks olid koostatud 2010. aastal kase (<i>Betula</i> spp.) ja hariliku kuuse (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) raiejäätmete virnad. Mõlemast virnast pool kaeti veekindla paberiga. Seejärel koguti igal aastal proove mõlema virna kattega ja katteta osast. Igast osast võeti 2 proovi - pealt ja keskelt. Alguses võeti proove mitu korda aastas, hiljem 1-2 korda aastas.</p> <p>Kase raiejäätmete tuhasisaldus aja möödudes tõusis, samas kuusel täheldati pigem tuhasisalduse langust. Niiskusesisaldus kaetud raiejäätmetel oli 10,65% madalam, kui katmata raiejäätmetel. Nii kuuse kui kase raiejäätmete mahumass ning niiske puidu alumine kütteväärtus langesid, kusjuures mõlemad omadused olid kattega raiejäätmetel kõrgemad. Ladustamisaja lõpuks oli energiasisaldus virna keskel võrreldes esialgsega kuuse raiejäätmete puhul 70,8% ning kase raiejäätmete puhul 44,6%.</p> <p>Kokkuvõtteks võib väita, et raiejäätmed tuleks pärast kuivamist võimalikult kiiresti töödelda hakkpuiduks ning suunata tarbimisse.</p> | | | |
| Märksõnad: tuhasisaldus, kütteväärtus, energiasisalduse kadu, massi kadu | | | |

| | | | |
|--|-------------|---|---------------|
| Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Abstract of Master´s Thesis | |
| Author: Sander Kaasik | | Curriculum: Forest Industry | |
| Title: Effects of storing on the properties of norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and birch (Betula spp.)forest residues for fuel | | | |
| Pages: 57 | Figures: 27 | Tables: 16 | Appendixes: - |
| Department / Chair: | | Chair of Forest Management Planning and Wood Processing Technologies | |
| Field of research: | | 1.5. Forest Sciences | |
| CERC S code: | | B430 Silviculture, forestry, forestry technology | |
| Supervisors: | | researcher Allar Padari <i>MSc</i> and lecturer Risto Mitt <i>MSc</i> | |
| Place and date: | | Tartu, 2018 | |
| <p>Properties of forest residues change during storing. The main purpose of this thesis was to research what effect storing period length has on the energy content and dry mass losses of forest residues. Also other properties like ash content, moisture content, energy content and diameeter shrinkage were studied.</p> <p>In the year 2010, two heaps of forest residues were created. One heap was made of birch residues and the other consisted of spruce residues. Half of both heaps were covered with waterproof paper. 4 samples were taken from each heap every time. 2 samples from the uncovered side of the heap and 2 samples from the covered heap. One of two samples on both sides was taken from the top of the heap and the other sample from the middle of the heap. In the beginning samples were collected multiple times evey year, but later only 1-2 times a year.</p> <p>Ash content of birch increased during the storing period, but the ash content of spruce showed signs of decrease instead. Moisture content in covered heaps was 10,65% lower than in uncovered heaps. Both, bulk density and net calorific value of moist wood, decreased for spruce and birch. Both properties changed less in covered forest residue heaps. By the end of the storage periood, the energy content of spruce residues were 70,8% and the energy content of birch residues were 44,6% of the original value.</p> <p>In conclusion it can be said that forest residues should be delivered to a customer as soon as they have dried.</p> | | | |
| Keywords: ash content, calorific value, loss of energy content, loss of mass | | | |

SISUKORD

| | |
|--|----|
| SISSEJUHATUS | 6 |
| 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE | 7 |
| 1.1. Puitkütuste kasutamine energeetikas..... | 7 |
| 1.2 Raidmete ja hakkpuidu müügitahud | 9 |
| 1.3 Puitkütuste liigitamine | 9 |
| 1.4 Hakkpuidu tootmine raiejäätmetest | 11 |
| 1.4.1. Hakkpuidu tootmise tehnoloogiad..... | 11 |
| 1.4.2. Niiskusesisaldus raiejäätmete kuhjas..... | 12 |
| 1.5 Puitkütuste omadused | 13 |
| 1.5.1. Puidu koostis | 13 |
| 1.5.2. Tuhasisaldus | 14 |
| 1.5.3. Kütteväärtus | 14 |
| 1.5.4. Puitkütuste kvaliteedinõuded | 15 |
| 2. METOODIKA | 16 |
| 2.1. Proovide päritolu..... | 16 |
| 2.2 Labortööd | 16 |
| 2.2.1 Kogutud proovikehade hakkimine | 16 |
| 2.2.2 Niiskusesisalduse määramine | 17 |
| 2.2.3. Diameetri kahanemine | 18 |
| 2.2.4. Mahumassi leidmine | 19 |
| 2.2.5. Jahvatamine | 20 |
| 2.2.6 Tuhasisaldus | 21 |
| 2.2.7 Kütteväärtus..... | 23 |
| 2.3. Andmetöötlus..... | 24 |
| 3. TULEMUSED JA ARUTELU | 28 |
| 3.1. Dispersioonanalüüsi tulemused | 28 |
| 3.2. Tuhasus | 29 |
| 3.3. Kütteväärtus | 32 |
| 3.3.1. Kuivaine alumine kütteväärtus | 32 |
| 3.3.2. Niiske puidu alumine kütteväärtus | 34 |
| 3.4. Mahukaal..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Energiatihedus..... | 37 |
| 3.6. Niiskusesisaldus..... | 39 |
| 3.7. Diameetri kuivamiskahanemine..... | 43 |
| 3.8. Kahanemise ja niiskuse muutused | 44 |
| 3.9. Puidu kadu..... | 47 |
| 3.10. Energiasisalduse muutus raiejäätmetes..... | 49 |
| KOKKUVÕTE | 51 |
| KASUTATUD KIRJANDUS..... | 53 |

SISSEJUHATUS

Maailmas pannakse üha suuremat rõhku taastuvenergia kasutamisele. Euroopa liit näeb ette, et aastaks 2020 oleks taastuvatest allikatest toodetud energia osakaal vähemalt 20% kogu energiatoodangust (Euroopa Liidu Teataja 2009). Aastaks 2030 peab vastav näitaja olema juba 27% (Taastuvenergia kasutamise... 2017).

Eesti energiamajanduse arengukava järgi peab taastuvenergia osakaal aastaks 2020 olema 25%, mis on rohkem, kui näeb ette Euroopa liit samaks ajaks. Aastaks 2030 peab taastuvenergia osakaal Eesti lõpptarbimises olema koguni 50%, sealjuures sooja tootmisel tuleb kasutada 80% ulatuses taastuvaid allikaid (Energiamajanduse... 2016).

Kuna Eestis on kõige kättesaadavamaks ja enim kasutatavaks taastuvenergiaallikaks puit, kuid alati ei saa või pole mõistlik kohe raiejäätmetele järele minna, siis jäävad jäätmed mõneks ajaks seisma. Käesoleva töö eesmärk oli uurida, kuidas pikaajaline ladustamine raiejäätmete omadusi mõjutab. Töö on jätk Sten Veelaku 2013. aasta magistritööle, kus uuriti samade raiejäätmete omaduste muutusi ajavahemikul 2010-2012.

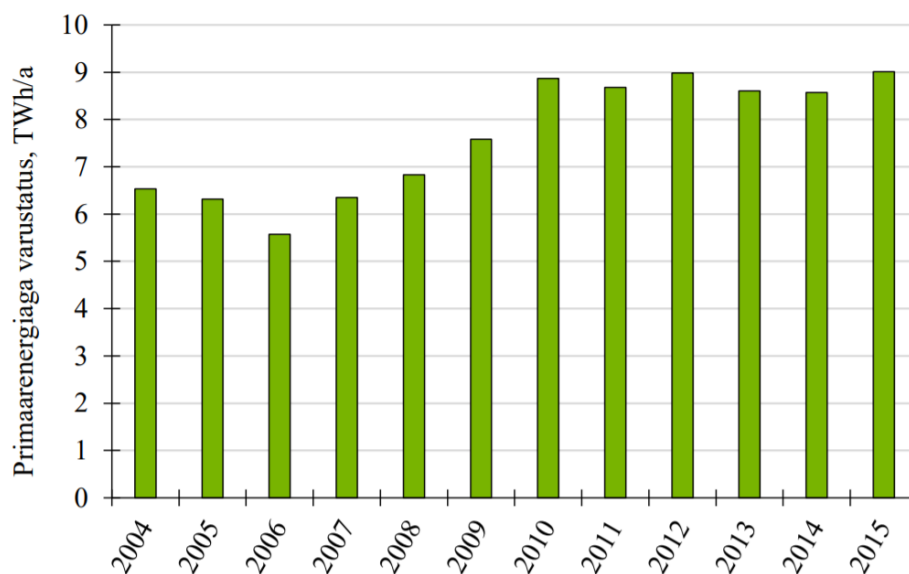
Töö esimeses pooles anti lühike ülevaade puidu kasutamisest energeetikas, raiejäätmete varumise ja ladustamise meetoditest ning puitkütuste omadustest. Teises pooles on uuritud seoseid raiejäätmete omaduste ning ladustamise aja, meetodi (katteta või kattega) ja asukoha (virna peal või keskel) vahel. Töö põhieesmärgiks oli teha kindlaks raiejäätmete ladustamise jooksul puidu lagunemise tõttu tekkiv kadu. Samuti leiti puitkütuste omaduste (tuhasisaldus, kütteväärtus, niiskus, mahukaal) muutumist kirjeldavad algoritmid.

Autor soovib tänada töö juhendajaid Allar Padarit ja Risto Mitti, kes olid suureks abiks käesoleva töö koostamisel, samuti Linnar Pärna, kes aitas teostada labortöid.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Puitkütuste kasutamine energeetikas

Eestis enim kasutatav taastuvenergia allikas, eriti soojatootmises on puit. Näiteks 2002 aastal moodustas biomass üle 99% kogu kasutatud taastuvenergiast (Vares *et al.* 2005). Eesti metsanduse arengukava aastani 2020 sätestab, et puitkütuste kasutamise maht energiatootmises peaks suurenema 6,1 TWh-lt (2009) kuni 8,3 TWh-ni (2020) (Eesti metsanduse... 2010). Sinna sisse on arvestatud ainult tüvedest saadav puit, välja on jäetud mittemetsamaalt saadav puit ning puidutööstuste jäätmed (Eesti metsanduse... 2010). Samas jooniselt 1 on näha, et vastav piir ületati juba 2010. aastal ning seda peamiselt raiejäätmete laialdasema kasutuselevõtuga. Summaarne puidu energeetiline potentsiaal on ligikaudu 18 TWh aastas (Energiamajanduse...2016).



Joonis 1. Puidu kasutamine primaarenergia tootmisel (Energiamajanduse...2016).

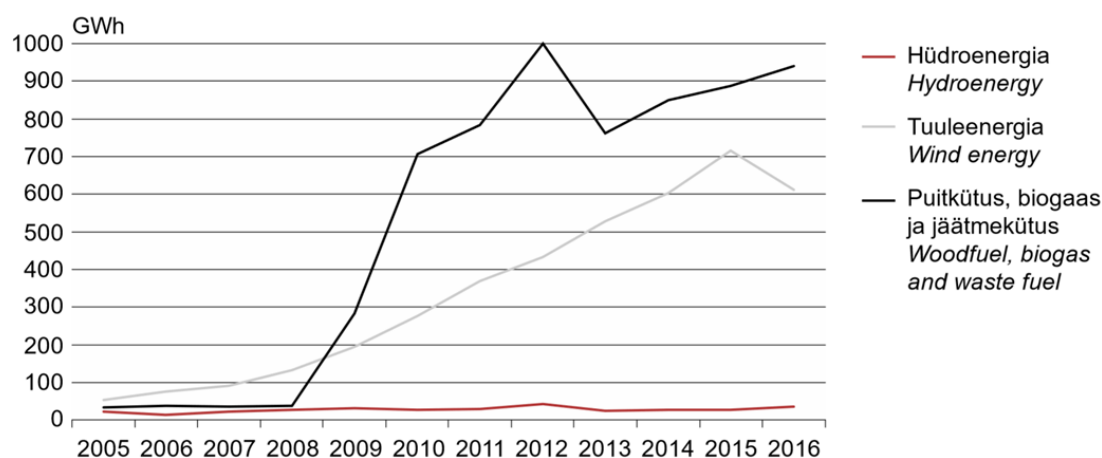
Kõige rohkem hakkpuitu tarbivad Eestis elektri- ja soojusjaamad (Energiamajanduse... 2016). Suurematesse linnadesse on rajatud soojuse ja elektri koostootmisjaamad. 2014. aasta seisuga töötasid koostootmisjaamad, mis kasutasid hakkpuitu ja turvast, järgmistes linnades: Tallinn, Tartu, Pärnu, Kuressaare, Paide, Rakvere. Paljudes linnades on sooja tootmiseks veel maagaasil ja põlevkivil töötavaid soojusjaamu, mis oleks võimalik taastuvenergiat

kasutavate vastu ümber ehitada või vahetada. 2016. aastal kasutati koostootmisjaamades 1,377 miljonit m³ hakkpuitu, mis oli ligikaudu 15% rohkem kui 2014. aastal (Statistikaamet 2018). Tabelis 1 on toodud energiatootmiseks tarbitud hakkpuidu ja jäätmete mahud aastatel 2011-2016. Soojuse tootmiseks kasutatud puitkütuste hulk oli 2016. aastaks võrreldes 2011. aastaga rohkem kui 50% suurenenud.

Tabel 1. Energia tootmiseks tarbitud hakkpuit ja jäätmed, 1000 m³ (Statistikaamet 2018)

| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|---------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| Elektri tootmiseks | 428,8 | 694 | 403 | 524 | 507 | 584 |
| Soojuse tootmiseks | 484,8 | 482 | 664 | 681 | 656 | 1080 |

Elektrit toodeti Eestis 2016. aastal kokku 12 TWh (Statistikaamet 2017). See oli 15% rohkem kui 2015. aastal, kuid samas vähenes taastuvatest allikatest toodetud elektri osakaal 6%. Elektrienergia tootmine taastuvatest allikatest on välja toodud joonisel 2.



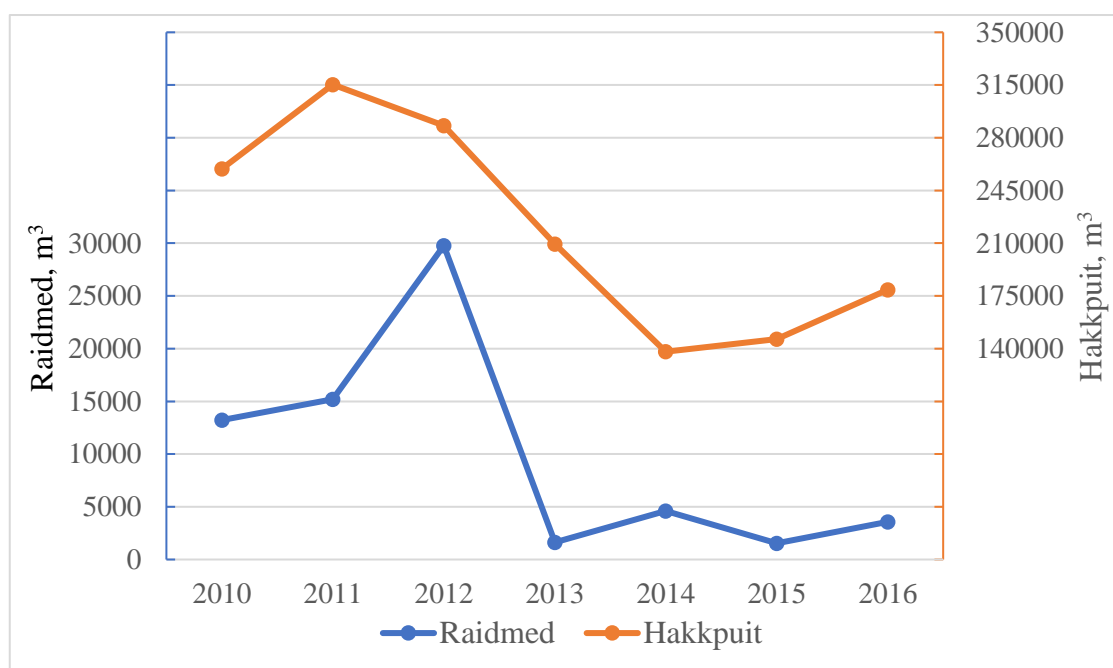
Joonis 2. Elektrienergia tootmine Eestis taastuvatest allikatest, 2005–2016 (Statistikaamet 2017).

Nagu jooniselt 2 selgub, on Eestis elektri tootmisel jätkuvalt enim kasutatavaks taastuvenergiaallikaks puitkütused. Samas Euroopas üldiselt on aga esikohal tuuleenergia kasutamine ning biomassi kasutamine elektri tootmiseks on viimasel ajal pidurdunud (Agora Energiewende and Sandbag 2018).

1.2 Raidmete ja hakkpuidu müüginahud

RMK müüs 2016. aastal 180 000 m³ hakkpuitu (Riigimetsa...2018a). Raiejäätmete, sealhulgas tüveste ning võsa müüginah 2016. aastal oli kõigest 3500 m³ (Riigimetsa...2018b)

Joonisel 3 on näha kuidas raidmete ning hakkpuidu müük on vahemikus 2010 kuni 2016 muutunud (Aastaraamat...2017).

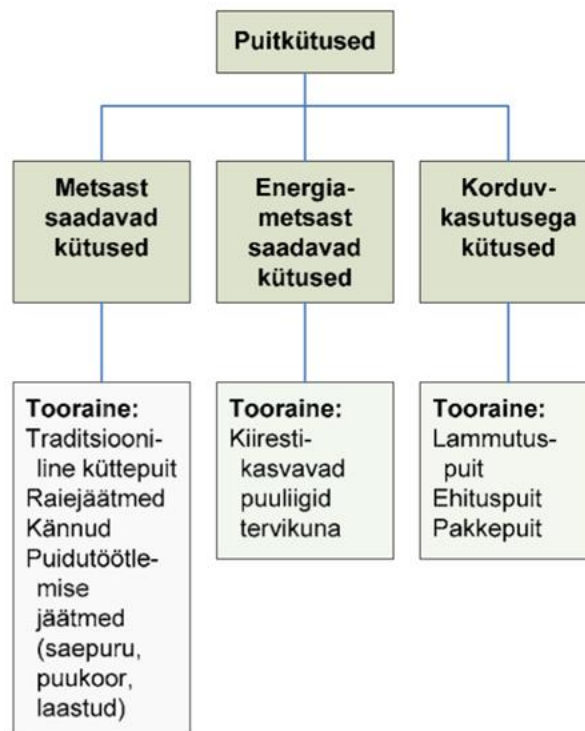


Joonis 3. Raidmete ja hakkpuidu müük aastatel 2010-2016 (Aastaraamat... 2017).

Raidmete ning hakke müük tegi 2012. aastal suure languse, mille üks põhjustest oli see, et Narva elektrijaam lõpetas hakkpuidust taastuvenergia tootmise (Erametsakeskus 2013).

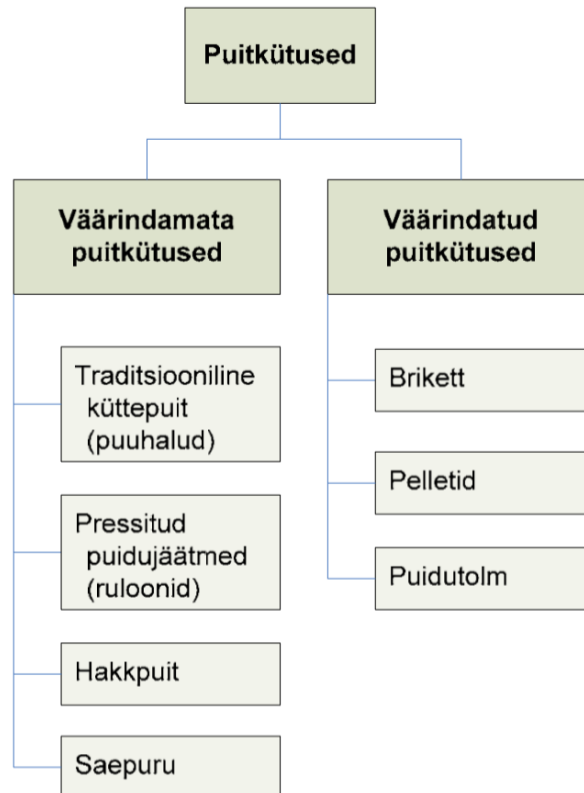
1.3 Puitkütuste liigitamine

Puitkütuseid võib liigitada mitut moodi, üheks võimaluseks (joonis 4) on nende liigitamine tooraine päritolu järgi metsast ja energiametsast saadavateks ning korduvkasutusega kütusteks (Vares *et al.* 2005). Esimest kahte võib pidada keskkonnasõbralikeks, viimane seda aga ei ole, kuna tegemist on töödeldud puiduga, mis võib olla immutatud, värvitud või sisaldada metalli, plastikut jne.



Joonis 4. Puitkütuste liigitamine nende päritolu järgi (Vares *et al.* 2005).

Teine võimalus puitkütuseid liigitada on selle järgi, kas nad on väärindamata või väärindatud (joonis 5) (Vares *et al.* 2005). Väärindamata puitkütused on sellised, mis on vaid saetud, lõhutud, hakitud või pakendatud nt. puuhalud, hakkpuit, saepuru. Väärindatud puitkütusteks loetakse nt. pelletid ja brikett.



Joonis 5. Puitkütuste liigitamine nende vääridusastme järgi (Vares *et al.* 2005).

Väärindamata puitkütused on odavamad, kuid omavad võrreldes väärintatud kütustega tunduvalt väiksemat kütteväärtust mahuühiku kohta. Ka on väärintatud kütuse omadused väiksema varieeruvusega

1.4 Hakkpuidu tootmine raiejäätmetest

1.4.1. Hakkpuidu tootmise tehnoloogiad

Raiejäätmetest hakke tootmisel on levinud 2 peamist meetodit (Vares *et al.* 2005, Nilsson *et al.* 2015). Ühel juhul jäetakse jäätmed raie käigus langile väikestesse kuhjadesse kuivama, teisel juhul viiakse värsked raiejäätmed kohe vahelattu suurde kuhja kuivama. Puitkütuste metsast väljaveol on oluline pöörata tähelepanu ka mineraalainete kaole, mis tüvede ja okste väljaveol sealt minema viiakse. Võrreldes värskeste raiejäätmete langiäärde veoga, jääb raielangil väikestes kuhjades kuivades metsa maha kukkunud okaste, lehtede ja väiksemate

okste näol alles rohkem mineraalaineid (Nurmi 1999, Nilsson *et al.* 2018). Mineraalainete kadu erinevate tehnoloogiate korral on välja toodud tabelis 2.

Tabel 2. Mineraalainete kadu erinevate tehnoloogiate korral (Serup *et al.* 2005)

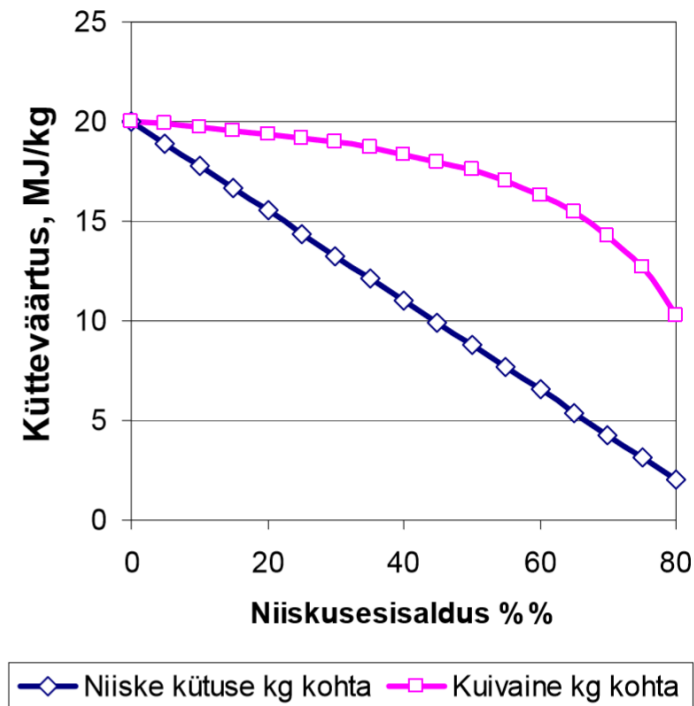
| Mineraalainete kadu (kg/ha) | Lämmastik (N) | Fosfor (P) | Kaalium (K) | Magneesium (Mg) | Kaltsium (Ca) |
|---------------------------------------|------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------|
| 1. Tüved | 170 | 54 | 205 | 23 | 234 |
| 2. Hakkimine eelneva kuivatamisega | 214 | 58 | 213 | 26 | 259 |
| 3. Värske puidu hakkimine | 252 | 61 | 230 | 30 | 294 |
| Mineraalainete kadu (%) | | | | | |
| 1. Hakkimine eelneva kuivatusega | 26 | 7 | 4 | 13 | 11 |
| 2. Värske puidu hakkimine | 48 | 13 | 12 | 30 | 26 |

Üheks võimaluseks kuidas mineraalainete kadu vähendada, oleks tuha metsa tagasi viimine (Swedish...2008 ref. de Jong *et al.* 2016). Juhul kui oksad ja ladvad raie käigus ära viiakse, siis Rootsi tingimustes oleks tuhka sobiv metsa tagasi viia kuni 3 tonni/ha kohta. Tuha tagasiviimise kasulikkus oleneb samas ka kasvukohast, nt mineraalmuldadele tuha viimisel ei ole olulist kasu märgata, samas turbamuldadel on kasu märkimisväärne (Röser *et al.* 2008, de Jong *et al.* 2016).

1.4.2. Niiskusesisaldus raiejäätmete kuhjas

Värskete raiejäätmete niiskusesisaldus on enamasti 50-60%. (Andersson 2002 ref. Nilsson 2016). Sõltumata eelpool välja toodud raiejäätmete kogumise meetoditest on tavaliselt niiskus virnades pärast suvekuudel seismist 30-40% (Nilsson *et al.* 2013). Sealjuures virna keskel on niiskusesisaldus väiksem, kui peal (Filbakk 2011 ref. Nilsson *et al.* 2015). Kuivamisel mängib suurt rolli ka ilm ning aastaaeg, nt kui väheste sademetega suvel võib raiejäätmete virna niiskusesisaldus alla 30% olla, siis talvel võib see olla ka üle 65%, sest lumi ja jää on kogunenud materjali peale ja vahele (Huhtinen 2006). Kaitseks liigse niiskuse eest kaetakse virnad sageli spetsiaalse paberiga. On tähele pandud, et kaetud virnades on niiskusesisaldus tavaliselt 7-10% väiksem, kui katmata virnades (Alakangas 2005).

Raiejäätmete niiskusesisaldusest sõltub otseselt ka kütteväärtus. Niiskusesisalduse ja kütteväärtuse suhe on näha joonisel 6.



Joonis 6. Kütteväärtuse ja niiskusesisalduse sõltuvus teineteisest (Vares *et al.* 2005).

Kui puidu niiskusesisaldus tõuseb 70-80%-ni, siis puit enam iseseisvalt ei põle (Huhtinen 2006).

1.5 Puitkütuste omadused

1.5.1. Puidu koostis

Puit koosneb peamiselt kolmest ühendist: tselluloos, ligniin ning hemitselluloos (Alakangas 2005). Kuusk ja kask sisaldavad 40-45% tselluloosi. Hemitselluloosi sisaldus on kuusel 25-28% ning kasel 37-40%. Ligniini sisaldus on okaspuudel 24-33% ja lehtpuudel 16-25%. Tabelis 3 on näha puidus enimesinevad keemilised elemendid ja nende sisalduse protsent (Vares *et al.* 2005).

Tabel 3. Puidu keemiline koostis (Vares *et al.* 2005)

| Element, % kuivaines | Puit | Koor |
|----------------------|---------|-----------|
| Süsinik | 48-50 | 51-66 |
| Vesinik | 6-6,5 | 5,9-8,4 |
| Hapnik | 38-42 | 24,3-40,2 |
| Lämmastik | 0,5-2,3 | 0,3-0,8 |
| Väävel | 0,05 | 0,05 |
| Kloor | <0,01 | 0,01-0,03 |

Lisaks on puidus veel erinevaid ekstraktiivaineid nt. tõrva, vaike, fenoole ja muud (Vares *et al.* 2005). Nende ainete hulk puidus on tavaliselt kuni 5%, kooses aga koguni 30-40% (Alakangas 2005).

1.5.2. Tuhasisaldus

Allikates on toodud erinevaid andmeid puitkütuste tuhasisalduse kohta. Raiejäätmete tuhasisaldus on üldiselt ligikaudu 1,33%, samas hariliku kuuse raiejäätmete tuhasisaldus on vahemikus 2-6% (Taipale 1996 ref. Alakangas 2005). Kuuse koore tuhasisaldus on 2,34-2,8% ning kase koore vastav näitaja on ligikaudu 1,6%. Sealjuures kaetud raiejäätmete virnades on väiksem tuhasisaldus kui katmata virnades (Nurmi 1999 ref Alakangas 2005).

On tähele pandud ka, et tavaliselt on puitkütuste tuhasisaldus väiksem, kui teistel tahketel kütustel (Kytö *et al.* 1983 ref. Alakangas 2005).

1.5.3. Kütteväärtus

Hariliku kuuse tüvepuidu kuivaine alumine kütteväärtus on 19,02 MJ/kg noorematel ja 19,16 MJ/kg vanematel puudel (Nurmi 1993 ref. Alakangas 2005). Kuuse ladva kütteväärtus on 19,77 MJ/kg noortel ja 19,41 MJ/kg kohta vanadel puudel. Arukase koorega tüve alumine kütteväärtus on 19,15 MJ/kg noortel puudel ning 18,96MJ/kg kohta vanematel puudel. Kase latvade kütteväärtused noortel ja vanadel puudel on vastavalt 19,53 MJ/kg ja 19,61 MJ/kg.

Ilma lehtede või kooreta raiejäätmete kuivaine alumine kütteväärtus kasel on 19,0 ja kuusel 19,7 MJ/kg (Alakangas 2005).

1.5.4. Puitkütuste kvaliteedinõuded

Puitkütuseid tarbivatel ettevõtetel on kindlad nõuded, millised peavad olema hakkpuidu niiskusesisaldus, energiatihedus ja tuhasisaldus. Üheks olulisemaks faktoriks puidu energeetikas kasutamisel on selle niiskus. Mida kõrgem on niiskusesisaldus, seda madalam on kütteväärtus, sest palju energiat kulub enne põlemist puidu kuivatamisele (Kizha and Han 2017). Reeglina mida suurema võimsusega on jaam, seda niiskemat materjali on võimalik seal ära kasutada. Kuni 1 MWh võimsused jaamades peaks niiskus olema 25-40%, 1-5 MWh jaamades 40-55% (Alexander 1994 ref. Hoyne and Thomas 2001).

Järgnevalt on loetletud OÜ Utilitas Tallinna elektrijaama ja AS Utilitas katlamajade kehtestatud nõuded kokku ostetava hakkpuidu kvaliteedile (OÜ Utilitas... 2018):

- Kütuse suhteline niiskusesisaldus peab elektrijaamas jääma vahemikku 30% kuni 60% ning katlamajades vahemikku 30% kuni 50%.
- Maksimaalne tuhasisaldus elektrijaamas võib olla kuni 3% ning katlamajades kuni 2%.
- Kütus ei tohi sisaldada liiva, kive, plastikut, kemikaale, metalle ega muid lisandeid.
- Lubatud ei ole lumi, jää ning rohelised okkad ja lehed.

Võrdluseks, AS Tartu Jõujaam nõuded niiskusele on 30% - 56% ning tuhasusele kuni 5% (Kütuse ost-müük 2018). Sarnaseid hakkpuidu kvaliteedinõudeid kasutavad ka teised soojust tootvad ettevõtted.

2. METOODIKA

2.1. Proovide päritolu

Töös kasutatud proovid pärinevad Järvelja Õppe- ja Katsemetskonnast, kuhu rajati 2010. aastal kevadel 2 proovivirna. Ühes virnas olid kase (*Betula* spp.) raiejäätmed ja teises hariliku kuuse (*Picea abies* (L.) Karst.) raiejäätmed (edaspidi kasutatakse töös vastavalt kask ja kuusk). Mõlemast virnast pool oli kaetud kattega. Kuuse raielank asus kvartalil JS177 eraldisel 8 ning kase raielank kvartalil JS207 eraldisel 3. Raiejäätmete virnade katmata ja kaetud osadest võeti 2 proovi: virna keskelt ja virna pealt. Proovid võeti järgmistel kuupäevadel: 16.06.2010, 02.09.2010, 22.11.2010, 07.03.2011, 02.09.2011, 15.02.2012, 25.04.12, 04.06.2012, 24.08.2012, 23.11.2012, 16.05.2013, 26.11.2013, 25.06.2014, 12.12.2014, 26.08.2015, 28.08.2016 ning 18.03.2018. Võetud proovid koosnesid enamasti 3-4st ligikaudu 50cm pikkusest oksajupist. Proovid suleti pärast kogumist õhukindlalt kottidesse ning võeti laboritööde teostamiseks kaasa.

2.2 Labortööd

2.2.1 Kogutud proovikehade hakkimine

Kogutud oksad hakiti oksapurustiga Bosch AXT 2500HP (joonis 7). Oksapurustisse mahtusid maksimaalselt 40 mm läbimõõduga oksad (Bosch... 2018), seetõttu tuli suuremaid oksa kirvega väiksemaks lõhkuda. Enne hakkimist saeti okstest ka 3 ligikaudu 5-10cm pikkust tükki mahumassi ning diameetri kahanemise määramiseks.



Joonis 7. Oksapurusti Bosch AXT 2500HP.

Pärast iga proovi hakkimist oksapurusti ja kogumiskott puhastati, et erinevad proovid omavahel ei seguneks. Hakitud proovid ja 3 oksatükki pandi tagasi samadesse kottidesse, kus nad ennegi olid ning viidi puitkütuste laborisse edasiseks töötlemiseks.

2.2.2 Niiskusesisalduse määramine

Proovide niiskusesisalduse leidmiseks kasutati kuivatamis- ja kaalumismeetodit, vastavalt standardile EVS-EN 18134. Kõigepealt kaaluti kuivatamisel kasutatavad pappkarbid, seejärel pandi märg hakkpuit nummerdatud karpidesse ning kaaluti uuesti. Iga proovi jaoks kasutati kahte karpi. Pärast kaalumisi asetati proovid kaheks ööpäevaks kuivatuskappi Memmert UFE-600 (joonis 8). Kuivatuskapi temperatuur oli 101°C. Pärast kuivamist kaaluti karbid koos hakkpuiduga ning ilma. Proovide niiskusesisalduse leidmiseks kasutati suhtelise niiskuse valemit (1):

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_4) - (m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100, \quad (1)$$

kus M_{ar} – tarbimisaine niiskusesisaldus %;

m_1 – tühja karbi mass enne kuivatamist g;

m_2 – karbi ja proovi mass enne kuivatamist g.

m_3 – karbi mass pärast kuivatamist g;

m_4 – karbi ja proovi mass pärast kuivatamist g.



Joonis 8. Kuivamiskapp Memmert UFE-600.

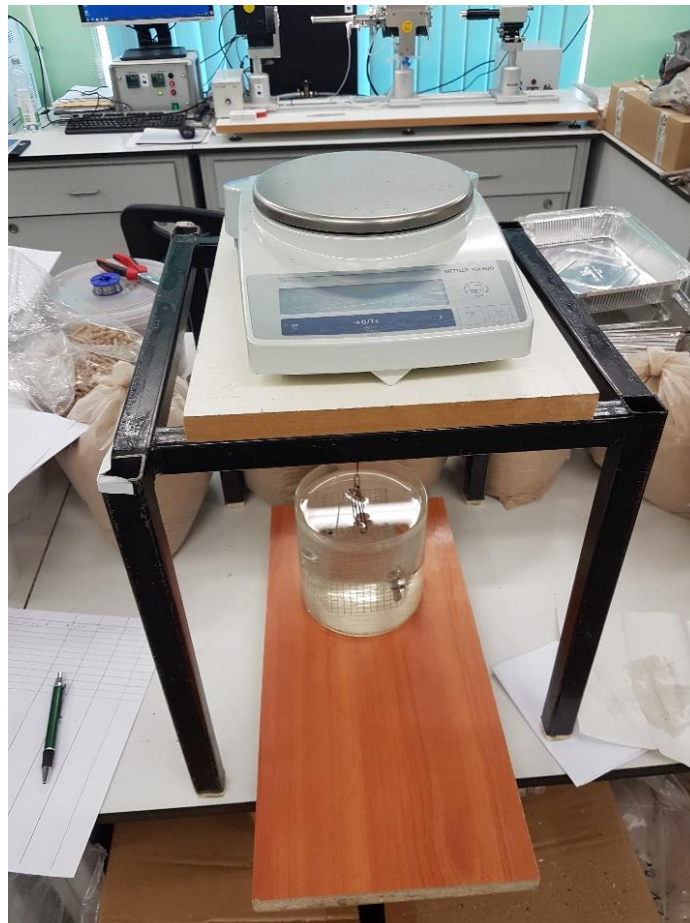
Pärast kuivatamist pandi kaalutud hakkpuidu proovid markeeritud õhukindlatesse kottidesse, kus need jäid ootama jahvatamist.

2.2.3. Diameetri kahanemine

Kuna puit kuivades kahaneb, siis selleks, et saada teada, kas pikaajaline raiejäätmete ladustamine mõjutab diameetri kahanemist kuivades, mõõdeti proovidest saetud oksalõikudel enne kuivama panekut koore alt digitaalse nihkkaliibriga kahest suunast 0,01 mm täpsusega diameetrid ning pandi kaheks ööpäevaks kuivatuskappi Memmert UFE-600 kuivama. Pärast kuivatamist mõõdeti diameetrid uuesti ning arvutati suhteline kahanemine. Kahanemise protsendi leidmiseks jagati märja ning absoluutkuiva oksa diameetrite vahe märja oksa diameetriga ning tulemus korrutati sajaga (Veelak 2013).

2.2.4. Mahumassi leidmine

Okste mahumassi leidmiseks kasutati kahe-suunalist kaalu METTLER TOLEDO PB3002 (joonis 9), kuhu alla oli riputatud puur. Puur oli asetatud veega täidetud anumasse, kus see ei tohtinud olla vastu põhja ega külgi ning pidi olema üleni vee all. Oksad kaaluti kuivalt, vees (puuris), märjalt ning seejärel asetati ööpäevaks kuivatuskappi, et saada absoluutkuiva puidu kaal.



Joonis 9. Kaal METTLER TOLEDO PB3002 koos lisadega mahumassi leidmiseks.

Okste mahu arvutamiseks kasutati valemit (2):

$$V_0 = m_1 - T, \quad (2)$$

kus V_0 – kuiva klotsi maht cm^3 ;

m_1 – märja klotsi mass g;

T – klotsi mass vees g (Savi 2010).

Mahumass leiti valemiga (3):

$$P_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad (3)$$

kus P_0 – absoluutkuiva puidu mahumass g/cm³;

m_0 – kuiva klotsi mass g;

V_0 – kuiva klotsi ruumala cm³.

2.2.5. Jahvatamine

Enne tuhasisalduse ja kütteväärtuse leidmist tuli hakitud proovid jahvatada veskiga Retsch (joonis 10). Jahvatamiseks seati masina kiiruseks 3000 pööret minutis ning valati veskisse. Enne uue proovi jahvatamist puhastati masin eelmise proovi jääkidest ja tolmust, et vältida proovide segunemist.



Joonis 10. Puiduveski Retsch.

Jahvatatud proovid pandi tagasi samadesse kreppkottidesse, kus need olid ka enne jahvatamist. Kütteväärtuse ja tuhasuse katsete teostamise eel võeti kottidest jahvatatud materjali ning kuivatati kuivatuskapis Memmert UNB-100 absoluutkuivaks (joonis 11).



Joonis 11. Kuivatuskapp Memmert UNB-100.

Seal hoiti proove vastavalt standardile EVS-EN 18134 vähemalt üks öö. Pärast kuivatamist algas kütteväärtuse ja tuhasisalduse määramine.

2.2.6 Tuhasisaldus

Tuhasisalduse määramine toimus vastavalt tahkete biokütuste määramise standardile EVS-EN ISO 18122. Protsessi alguses kuumutati tühjad tiiglid muhvelahjus MILESTONE PYRO (joonis 12) 125 kraadini ning seejärel võeti välja ja pandi eksikaatorisse ligikaudu kümneks minutiks jahtuma. Samal ajal olid teises eksikaatoris jahtumas kuivatatud proovid. Esmalt kaaluti tühjad tiiglid, seejärel täideti need jahvatatud ja kuivatatud prooviga ning kaaluti uuesti. Kaalumiseks kasutati kaalu METTLER TOLEDO XS205 (joonis 13). Kõikide proovidega tehti kolm kordust. Tuhastamiseks mahtus ahju korraga 12 tiiglit. Protsessi käigus tõusis temperatuur kõigepealt kindla kiirusega 250 kraadini ning püsis sellisena 1 tund. Edasi tõusis temperatuur 550 kraadini (+/-10 kraadi) ning püsis nii 120 minutit. Pärast seda tõsteti tiiglid jahtuma ning kaaluti tuha mass koos tiigliga.



Joonis 12. Muhvelahi Milestone Pyro.



Joonis 13. Kaal Mettler Toledo XS205.

Tuhasisalduse määramiseks kasutati järgmist valemit (4):

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}}, \quad (4)$$

- kus A_d – tüsisisaldus %;
- m_1 – tühja tiigli mass g;
- m_2 – tühja tiigli mass koos prooviga g;
- m_3 – tiigli mass koos tuhaga g;
- M_{ad} – proovi niiskusesisaldus %.

2.2.7 Kütteväärtus

Kütteväärtuse määramine toimus vastavalt standardile EVS-EN ISO 18125. Kütteväärtuse leidmiseks kaaluti tiiglitesse 0,5-0,6 grammi absoluutkuiva proovi. Seejärel pandi proov kalorimeetrisse IKA C5003 (joonis 14). Enne igat uut proovi kuivatati ja puhastati tiigel ning pomm. Kütteväärtuse leidmist tehti kahes korduses, kuid kui tulemuste erinevus oli rohkem kui 125 J/g, siis oli vajalik teostada ka kolmas katse.



Joonis 14. Kalorimeeter IKA C5003.

Kalorimeetriga saadud kütteväärtuste põhjal arvutati kuivaine alumine kütteväärtus ning niiske kütuse alumine kütteväärtus. Kalorimeetriga saadud kütteväärtus loeti võrdseks ülemise kütteväärtusega, sest Eesti tingimustes on väävlisisaldus, mis muidu tuleks saadud kütteväärtusest maha lahutada, minimaalne (Lõhmus *et al.* 2000).

Kuivaine alumise kütteväärtuse arvutamiseks kasutati valemit (5):

$$Q_{v,net,d} = [Q_{v,gr,d} - 206 \cdot w(H)_d] \cdot (1 - 0,01 \cdot M) - 23,0 \cdot M, \quad (5)$$

- kus
- | | |
|---------------|--|
| $Q_{v,net,d}$ | – kuivaine alumine kütteväärtus J/g; |
| $Q_{v,gr,d}$ | – kuivaine ülemine kütteväärtus J/g; |
| $w(H)_d$ | – kuivaine vesinikusisaldus %; |
| M | – niiskuse sisaldus %, kuivaine korral $M=0$; |
| 206 | – kondenseerumissoojus J/g. |

Alumise kütteväärtuse valemis vaja minev vesinikusisaldus arvutati vastavalt standardile CEN/TS 15296 (6):

$$w(H)_d = 6,1 \cdot \frac{100 - A_d}{100}, \quad (6)$$

kus $w(H)_d$ – kuivaine vesiniku sisaldus %;
 6,1 – raiejäätmete vesiniku sisaldus absoluutkuivas ja tuhavabas proovis %;
 A_d – kuivaine tuhasisaldus %.

Niiske kütuse energiakoguse leidmiseks kasutati valemit (7):

$$Q_{net} = (Q_{net,d} \cdot (100 - M_{ar}) \div 100 - 0,02441 \cdot M_{ar}) \div 3,6, \quad (7)$$

kus Q_{net} – tarbitava kütuse alumine kütteväärtus MWh/t;
 $Q_{net,d}$ – kuivaine alumine kütteväärtus MJ/kg;
 M_{ar} – tarbitava kütuse niiskus %;
 0,02441 – vee aurustamissoojusest tingitud parandustegur;
 3,6 – Teisendustegur MJ → MWh.

Lisaks arvutati kütteväärtus mahuühiku kohta, kasutades järgnevat valemit (8):

$$Q_{V,d} = P_0 \cdot Q_{v,net,d} \quad (8)$$

kus $Q_{V,d}$ – kuivaine alumine kütteväärtus mahuühiku kohta kJ/cm³;
 P_0 – absoluutkuiva puidu mahumass g/cm³;
 $Q_{v,net,d}$ – kuivaine alumine kütteväärtus kJ/g.

2.3. Andmetöötlus

Raiejäätmete omaduste muutuste kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsi. Selleks kasutati statistikaprogrammis R funktsiooni *lm* (Crawley 2007). Dispersioonanalüüsil katsetati erinevaid valemikujusid ning parimate näitajate järgi valiti välja alljärgnev (9):

$$y = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 \cdot b_0 \cdot t + a_6 \cdot b_1 \cdot t + a_7 \cdot b_2 \cdot t, \quad (9)$$

kus y – uuritav tunnus (niiskus, tuhasus, tihedus, ülemine kütteväärtus, alumine kütteväärtus, niiske materjali kütteväärtus, diameetri kahanemine või energiatihedus);
 t – ladustamise algusest möödunud aeg päev;
 b_0 – kase korral 1, kuuse korral 2;

- b_1 – kattega virnal 1, katteta virnal 2;
- b_2 – keskelt võetud proovil 1, pealt võetud proovil 2;
- a_1 – puuliigist tulenev konstant (kuusk);
- a_2 – ladustamismeetodist tulenev konstant (katteta);
- a_3 – proovi võtmise asukohast tulenev konstant (virna peal);
- a_0, a_4, a_5, a_6, a_7 – valemi kordajad.

Iga tunnuse (niiskus, tuhasus, tihedus, ülemine kütteväärtus, alumine kütteväärtus, niiske materjali kütteväärtus, diameetri kahanemine või energiatihedus); uurimisel ei kasutatud dispersioonanalüüsi valemis kõiki liikmeid. Liikmete valimisel jälgiti, millised konstandid olid olulised, millised mitte. Suure olulisuse tõenäosusega (enamasti $p > 0,1$) konstandi puhul eemaldati valemist vastav liige.

Raiejäätmete omaduste ja ladustamisaja vahelise seose uurimiseks kasutati ka regressioonanalüüsi funktsiooni *lm* (Crawley 2007) valemite (10):

$$y = a + b \cdot t, \quad (10)$$

- kus y – uuritav tunnus;
- a, b – valemi konstandid;
- t – ladustamise algusest möödunud aeg päev.

Aastaaja mõju kirjeldamiseks niiskusesisaldusele kasutati regressioonanalüüsil valemite (11):

$$niiskus = a_0 + a_1 \cdot Kuu + a_2 \cdot Kuu^2, \quad (11)$$

- kus a_0, a_1, a_2 – valemi kordajad;
- Kuu – kuu number: jaanuar 1, veebruar 2, märts 3 jne.

Okaspuu kahanemise ja niiskusesisalduse vahelise seose uurimiseks kasutati järgnevat valemite (12):

$$y = a_1 \cdot \frac{M_{ar}}{t + 1} + a_2 \cdot \ln(t \cdot M_{ar} + 1), \quad (12)$$

- kus y – okaspuu kahanemise ja niiskuse vaheline seos;
- a_1, a_2 – valemi konstandid;
- M_{ar} – tarbimisaine niiskusesisaldus %;
- t – aeg päev.

Lehtpuu raiejäätmete kahanemise ja niiskusesisalduse vahelist seost uuriti valemiga (13):

$$y = a_0 + a_1 \cdot M_{ar} + a_1 \cdot t^{M_{ar}} + a_3 \cdot t^2, \quad (13)$$

kus y – lehtpuu kahanemise ja niiskuse vaheline seos;

a_0, a_1, a_2, a_3 – valemi konstandid.

M_{ar} – tarbimisaine niiskusesisaldus %;

t – aeg päev.

Pärast regressioonivalemite koostamist funktsiooniga *lm* kontrolliti ka jääkide sobivust normaaljaotusele *Shapiro-Wilk*'i testiga funktsiooniga *shapiro.test* (Crawley 2007).

Raiejäätmete massi kao leidmiseks kasutati mitu arvutusetappi. Kõigepealt leiti kase ning kuuse niiskusesisaldus ladustamise alguses. Kase raiejäätmete niiskus oli alguses 25,60% ning kuusel 24,53% (edaspidi algniiskused). Järgnevalt leiti kõikidele proovidele orgaanilise aine massid vastavalt algniiskustele. Selleks arvutati esmalt olenevalt puuliigist valemiga 12 või 13 kahanemise suurus algniiskustele. Saadud kahanemiste järgi leiti proovide suhteline maht (absoluutkuiva materjali maht = 1) algniiskuste juures valemiga (14):

$$V = \left(\frac{1}{1 - kahanemine \div 100} \right)^2, \quad (14)$$

kus V – proovi suhteline maht algniiskuse juures;

kahanemine – proovi kuivamiskahanemine algniiskusest absoluutkuivani

Kuivaine mass algniiskuste juures olevas ruumalas (tingruumala) leiti absoluutkuiva tiheduse jagamisel valemiga 14 leitud ruumalaga. Seejärel teostati regressioonanalüüs leidmaks seos puidu massi ja ladustamisaja vahel. Regressioonanalüüsil kasutati järgnevat valemit (15):

$$m = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot aeg}, \quad (15)$$

kus m – mass tingruumalas g;

a_0, a_1 – valemi parameetrid;

aeg – aeg ladustamise algusest päev.

Regressioonanalüüsiks teisendati valem (16) lineaarsele kujule:

$$\ln(m) = \ln(a_0) + a_1 \cdot aeg, \quad (16)$$

Kuna raiejäätmete ladustamisel toimub nii massi muutumine, kui ka kütteväärtuse muutumine, siis neid suurusid koos analüüsides leiti ka energiasalduse muutumine algniiskuste juures.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Dispersioonanalüüsi tulemused

Tabelis 4 on toodud erinevate omaduste arvutusvalemite (valem 9) statistilised parameetrid ning tabelis 5 on toodud valemi 9 konstantide väärtused ja olulisuse tõenäosused. Kõik valemid tulid usaldusväärsed ($p < 0,05$).

Tabel 4. Erinevate tunnuste arvutusvalemite parameetrid

| Tunnus | p-väärtus | standardviga | R ² |
|------------------------------------|-----------|--------------|----------------|
| Tuhasus | 0,0032 | 0,4825 | 0,1286 |
| Ülemine kütteväärtus | <0,0001 | 0,1021 | 0,2120 |
| Alumine kütteväärtus | <0,0001 | 0,1026 | 0,2120 |
| Niiske kütuse alumine kütteväärtus | <0,0001 | 0,6905 | 0,3940 |
| Energiatihedus | <0,0001 | 0,3962 | 0,7718 |
| Niiskusesisaldus | <0,0001 | 11,4200 | 0,4087 |
| Mahukaal | <0,0001 | 0,0733 | 0,7789 |
| diameetri kahanemine | 0,0015 | 1,3550 | 0,0989 |

Tabel 5. Dispersioonanalüüsil leitud valemi (9) kordajad ja nende olulisuse tõenäosused

| Tunnus | Kordaja | | |
|------------------------------|---------|-----------|-----------|
| | Nimi | Väärtus | p-väärtus |
| A | B | 1 | 2 |
| Tuhasus, % | a0 | 1.561477 | <0,0001 |
| | a1 | 0.000941 | <0,0001 |
| | a2 | 0.315644 | 0,0230 |
| | a5 | -0.000310 | 0,0045 |
| | a6 | -0.000140 | 0,0341 |
| | a7 | -0.000122 | 0,0633 |
| Ülemine kütteväärtus, kWh/kg | a0 | 5.666000 | <0,0001 |
| | a1 | 0.000083 | 0,0090 |
| | a5 | -0.000039 | 0,0054 |
| | a7 | 0.000021 | 0,1285 |

Tabeli 5 järg

| A | B | 1 | 2 |
|--|----|-----------|---------|
| Alumine kütteväärtus, kWh/kg | a0 | 5.323000 | <0,0001 |
| | a1 | 0.000085 | 0,0081 |
| | a5 | -0.000039 | 0,0052 |
| | a7 | 0.000021 | 0,1380 |
| Niiske kütuse alumine kütteväärtus, kWh/kg | a0 | 4.162196 | <0,0001 |
| | a1 | -0.001087 | <0,0001 |
| | a3 | -0.643537 | <0,0001 |
| | a5 | 0.000423 | <0,0001 |
| Energiatihedus, MWh/m ³ | a0 | 3.055000 | <0,0001 |
| | a1 | -0.000846 | <0,0001 |
| | a2 | 0.925200 | <0,0001 |
| | a3 | -0.232900 | 0,0012 |
| | a5 | 0.000248 | 0,0068 |
| Niiskusesisaldus, % | a0 | 19.555851 | <0,0001 |
| | a1 | 0.018712 | <0,0001 |
| | a3 | 10.657035 | <0,0001 |
| | a5 | -0.007217 | <0,0001 |
| Mahukaal, g/cm ³ | a0 | 0.571200 | <0,0001 |
| | a1 | -0.000160 | <0,0001 |
| | a2 | 0.173900 | <0,0001 |
| | a3 | -0.042530 | 0,0013 |
| | a5 | 0.000046 | 0,0069 |
| Diameetri kahanemine, % | a0 | 4.284253 | <0,0001 |
| | a2 | -0.791850 | 0,0012 |
| | a6 | 0.000150 | 0,0973 |

Tabelis 5 esitatud konstante ning valemit 9 kasutades on võimalik arvutada igale tunnusele erinevatele ajahetkedele väärtused. Vastavad tulemused on kujutatud järgnevate alapeatükkide joonistel.

3.2. Tuhasus

Proovide nimetamisel tabelites ning joonistel on kasutatud järgnevaid lühendeid: kattega virn – K-ga, katteta virn – K-ta, asukoht virna peal – P, asukoht virna keskel – K.

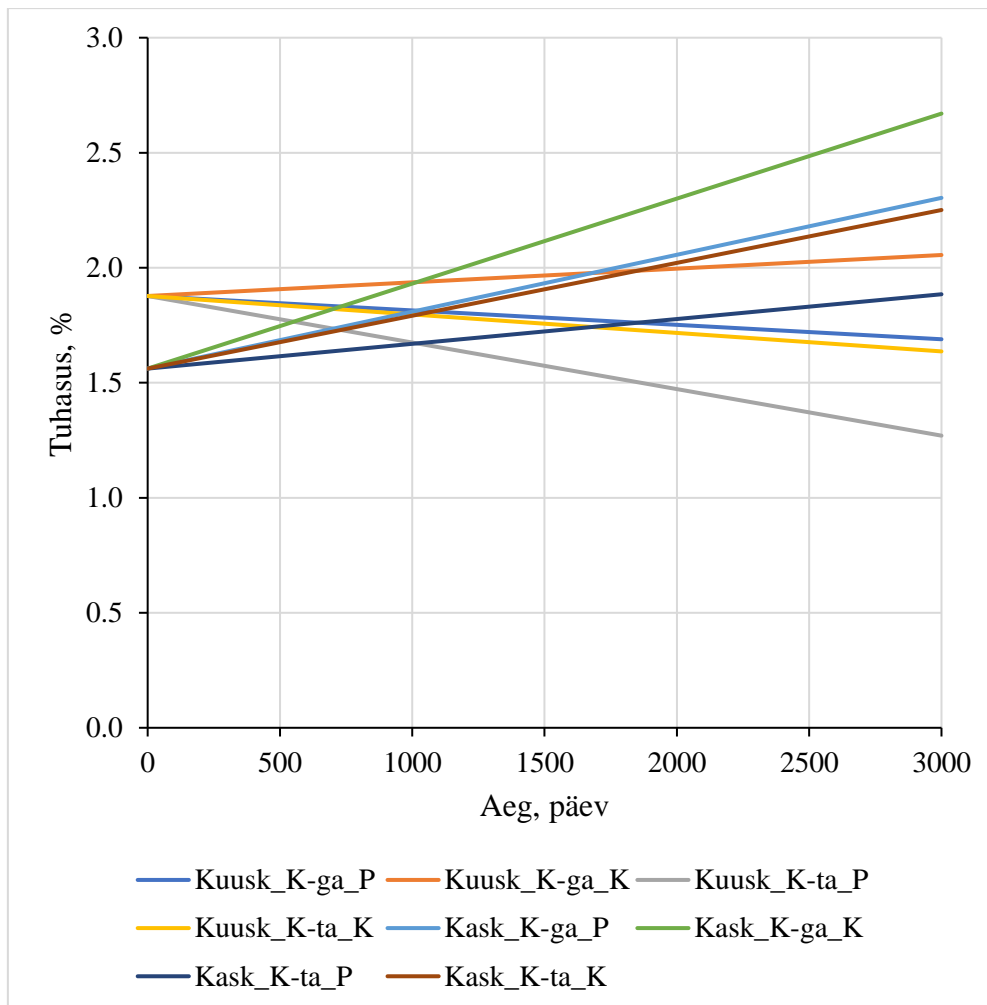
Valemikuju 10 kasutades teostati igale grupile eraldi regressioonanalüüs. Gruppidesse on koondatud andmed vastavalt puuliigile, ladustamismeetodile ning proovi asukohale virnas.

Regressioanalüüsi tulemused on esitatud tabelis 6. Kui ladustamismeetodit või proovi asukohta tabelis pole märgitud, siis regressioanalüüsis vastava tunnuse järgi andmeid ei eraldatud. Tabelis 6 nähtub, et oluliselt muutub vaid kase raiejäätmete tuhasused, mille proovid on võetud katte alt virna keskelt ($p = 0,003$). Usaldusväärne tuhasisalduse muutumine on ka siis, kui katte alt võetud proovide analüüsiks ei eraldatud virna pealt ja keskelt võetud proovide andmeid ($p = 0,002$). Samuti on usaldusväärne seos ladustamisaja ja tuhasisalduse vahel siis, kui analüüsida kõiki kase proove koos ($p = 0,002$). Muudel juhtudel jäi olulisuse tõenäosus suuremaks kui 0,05 ja seega ei saa väita, et neil juhtudel tuha sisaldus usaldusväärselt aja jooksul muutub.

Tabel 6. Tuhasuse regressioanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| Puuliik | Kate | Asukoht | A | B | R ² | Standardviga | p-väärtus |
|-------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Kuusk | K-ga | P | 2,050000 | -0,000090 | 0,0536 | 0,3133 | 0,3711 |
| Kuusk | K-ga | K | 1,763473 | 0,000139 | 0,0658 | 0,4341 | 0,3202 |
| Kuusk | K-ta | P | 1,825428 | -0,000343 | 0,1525 | 0,6690 | 0,1212 |
| Kuusk | K-ta | K | 1,872000 | 0,000007 | 0,0002 | 0,3790 | 0,9580 |
| Kuusk | K-ga | - | 1,907000 | 0,000025 | 0,0027 | 0,3790 | 0,7709 |
| Kuusk | K-ta | - | 1,843841 | -0,000166 | 0,0487 | 0,5870 | 0,2170 |
| Kuusk | - | - | 1,877000 | -0,000072 | 0,0122 | 0,5076 | 0,3728 |
| Kask | K-ga | P | 1,685580 | 0,000223 | 0,1395 | 0,4605 | 0,1542 |
| Kask | K-ga | K | 1,139706 | 0,000491 | 0,4592 | 0,4405 | 0,0028 |
| Kask | K-ta | P | 1,651000 | 0,000092 | 0,0261 | 0,4668 | 0,5356 |
| Kask | K-ta | K | 1,784713 | 0,000140 | 0,0496 | 0,5051 | 0,3905 |
| Kask | K-ga | - | 1,396123 | 0,000366 | 0,2810 | 0,4697 | 0,0015 |
| Kask | K-ta | - | 1,718035 | 0,000116 | 0,0360 | 0,4804 | 0,2825 |
| Kask | - | - | 1,561000 | 0,000239 | 0,1337 | 0,4793 | 0,0023 |

Tuhasuse muutuste üldiseks kirjeldamiseks kasutati dispersioanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 15, kus on näha, et kase raiejäätmetel esineb sõltumata asukohast tuhasisalduse tõus. Samas kuuse raiejäätmetel, mis on võetud katmata kuhjadest tuhasisaldus langeb. Langeb ka kuuse tuhasisaldus kattega virna keskelt võetud proovidest, kuid kattega virna pealt võetud proovide tuhasus ajaga nõrgalt suureneb.



Joonis 15. Tuhasuse muutus ladustamisaja jooksul.

Põhjuseks, et kuuse tuhasus mõningatel juhtudel langeb, võib olla juhuslik ning tingitud proovide erinevusest. Oli proove, mis olid peenematest okstest, teised jämedamateist. Samuti esines ka väga vaiguseid proove. Kinnitust ei leidnud ka Nurmi 1999 väide, et kaetud virnades on tuhasisaldus väiksem. Pigem oli tulemus hoopis vastupidine, ehk kaetud kuhjades oli tuhasisaldus suurem.

3.3. Kütteväärtus

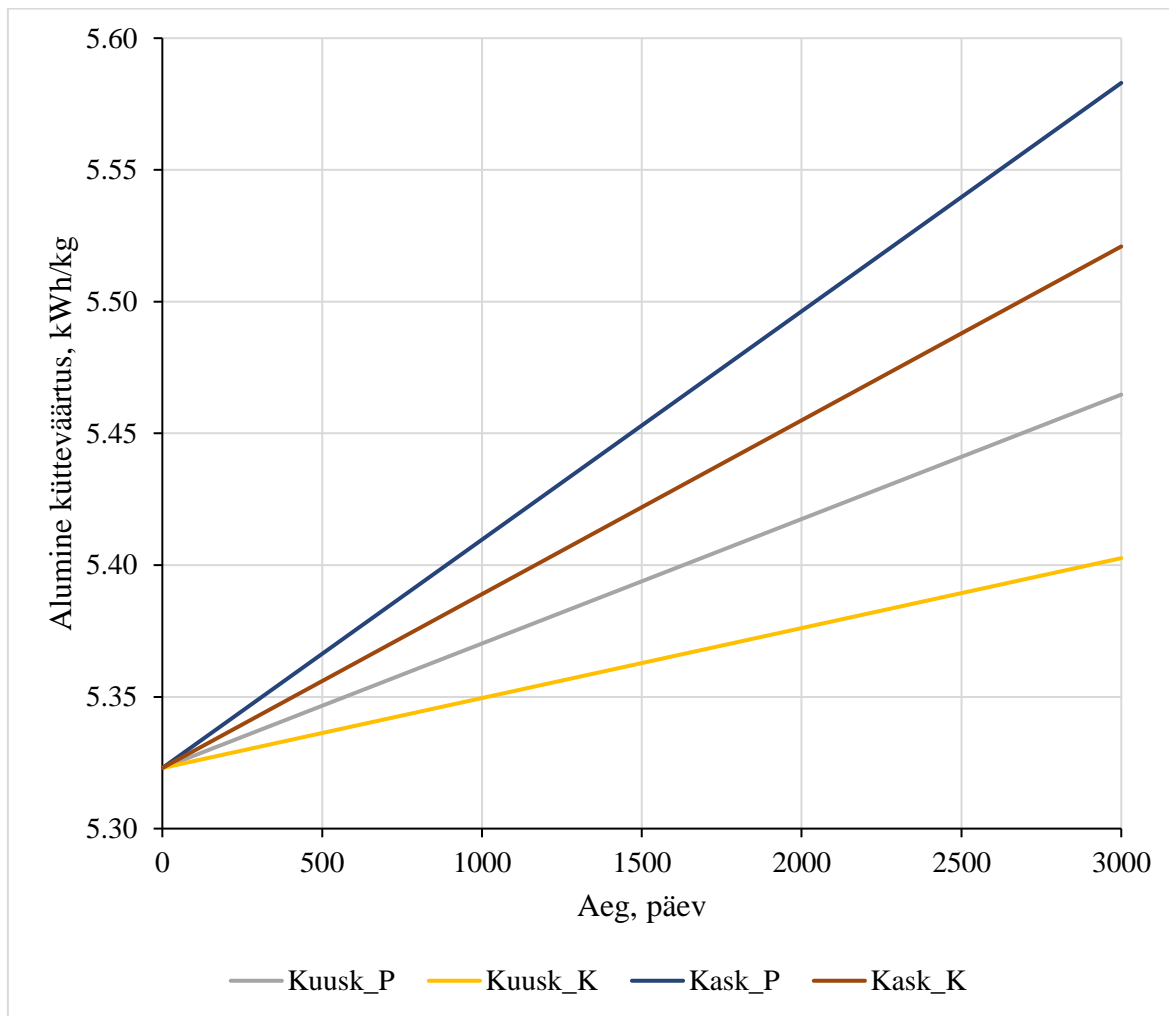
3.3.1. Kuivaine alumine kütteväärtus

Kuna ülemise ja alumise kütteväärtuse dispersioonanalüüsi tulemused olid väga sarnased, siis antud alapeatükis käsitletakse alumist kütteväärtust. Dispersioonanalüüsi tulemusi käsitlevas alapeatükis 3.1 on toodud ka ülemise kütteväärtuse andmeanalüüsi tulemused ning vajadusel on võimalik kasutada prognoosimiseks seal esitatud tulemusi. Valemikuju 10 järgi koostatud regressioonanalüüsi tulemused alumise kütteväärtuse ja ladustamisaja vahelise seose kohta on toodud tabelis 7. Regressioonanalüüs viidi läbi gruppide kaupa, kuhu on koondatud andmed vastavalt puuliigile, ladustamismeetodile ning proovi asukohale virnas. Kui ladustamismeetodit või proovi asukohta tabelis pole märgitud, siis regressioonanalüüsis vastava tunnuse järgi andmeid ei eraldatud. Tabelist nähtub, et kuuse raiejäätmete alumine kütteväärtus tõusis usaldusväärselt ladustamisperioodi jooksul keskmiselt päevas 0,000035 kWh/kg võrra ($p=0,0077$). Ka kaetud kuuse raiejäätmetel leiti usaldusväärne seos ajaga ($p=0,0248$), samas katmata jäätmetel usaldusväärset seost ei olnud. Kase raiejäätmete alumine kütteväärtus tõusis ladustamisperioodi jooksul päevas keskmiselt 0,000078 kWh/kg võrra ($p=0,0001$). Kase raiejäätmete kütteväärtuste tõus oli usaldusväärne nii kattega ($p=0,0033$), kui ka katteta raiejäätmetel ($p=0,0042$). Kõik usaldusväärsed regressioonivalemite parameetrid on esitatud rasvases kirjastiilis.

Tabel 7. Kuivaine alumise kütteväärtuse regressioonanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| Puuliik | Kate | Asukoht | a | b | R ² | Standardviga | p-väärtus |
|--------------|-------------|----------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Kuusk | K-ga | P | 5,333652 | 0,000044 | 0,0795 | 0,1230 | 0,2730 |
| Kuusk | K-ga | K | 5,306000 | 0,000054 | 0,3579 | 0,0602 | 0,0112 |
| Kuusk | K-ta | P | 5,326000 | 0,000001 | 0,0002 | 0,0525 | 0,9556 |
| Kuusk | K-ta | K | 5,340000 | 0,000039 | 0,2197 | 0,0614 | 0,0670 |
| Kuusk | K-ga | - | 5,320000 | 0,000049 | 0,1477 | 0,0943 | 0,0248 |
| Kuusk | K-ta | - | 5,333000 | 0,000021 | 0,0630 | 0,0635 | 0,1587 |
| Kuusk | - | - | 5,326000 | 0,000035 | 0,1042 | 0,0806 | 0,0077 |
| Kask | K-ga | P | 5,334000 | 0,000065 | 0,3743 | 0,0697 | 0,0118 |
| Kask | K-ga | K | 5,311000 | 0,000042 | 0,1683 | 0,0777 | 0,1019 |
| Kask | K-ta | P | 5,307000 | 0,000152 | 0,3489 | 0,1720 | 0,0125 |
| Kask | K-ta | K | 5,327000 | 0,000054 | 0,1364 | 0,1113 | 0,1446 |
| Kask | K-ga | - | 5,321000 | 0,000054 | 0,2461 | 0,0759 | 0,0033 |
| Kask | K-ta | - | 5,317000 | 0,000103 | 0,2288 | 0,1512 | 0,0042 |
| Kask | - | - | 5,319000 | 0,000078 | 0,2044 | 0,1221 | 0,0001 |

Alumise kütteväärtuse muutuse kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 16. Valemist on välja jäetud katte olemasolu, sest selle mõju raiejäätmete kuivaine alumisele kütteväärtusele ei suudetud tõestada. Joonisel 16 on näha, et lehtpuu raiejäätmete alumised kütteväärtused tõusevad ladustamisaja pikenedes rohkem, kui okaspuu omad. Samuti on mõlema puuliigi korral märgata, et virna peal olevate raiejäätmete kütteväärtused tõusevad aja möödudes rohkem.



Joonis 16. Kuivaine alumise kütteväärtuse seos ladustamisajaga (P – virna peal, K – virna keskel).

Kütteväärtuse tõusu võib seletada sellega, et ladustamisaja jooksul lagunesid kiiremini väiksema energiasisaldusega puidu koostisosad (tselluloos ja hemitselluloos). Tselluloosi energiasisaldus on 17,4-18,2 MJ/kg, samas ligniini 25,5 MJ/kg (Saarman ja Veibri 2006).

3.3.2. Niiske puidu alumine kütteväärtus

Lisaks kuivaine alumisele kütteväärtusele leiti ka niiske kütuse alumise kütteväärtuse sõltuvus ladustamisajast (valem 7). Kütteväärtuse ja ladustamisaja vahelise seose uurimiseks kasutati regressiooni valemit 10. Valemi tulemused on välja toodud tabelis 8, kus on näha, et nii kuuse, kui ka kase raiejäätmete kütteväärtus ladustamisaja pikenedes väheneb. Kuuse raiejäätmete kütteväärtus väheneb iga päevaga 0,000314 kWh/kg võrra ($p=0,0041$). Kase raiejäätmete kütteväärtus langeb kiiremini kui kuuse oma, vähenedes päevas 0,000590 kWh/kg võrra ($p=0,000032$).

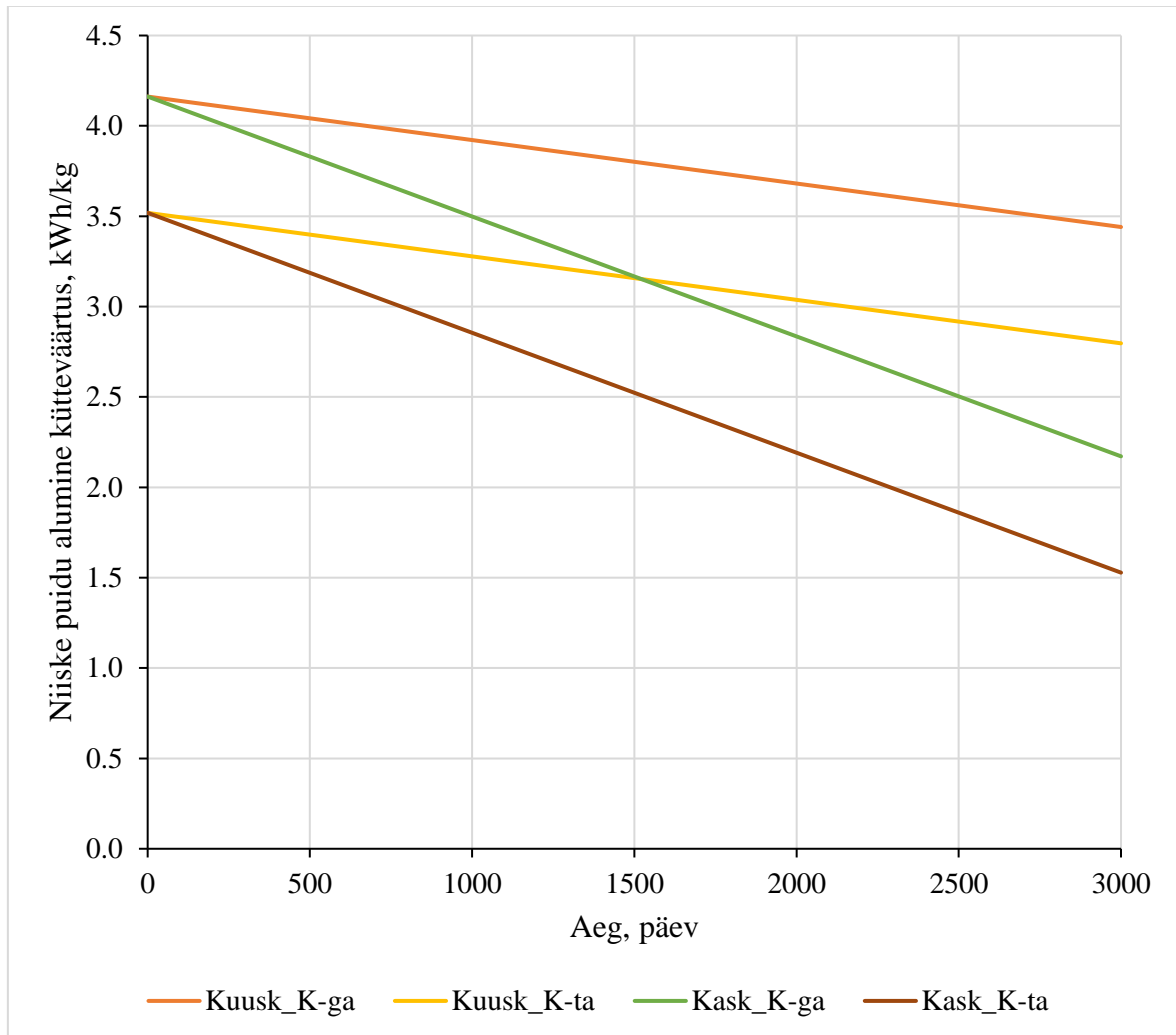
Tabel 8. Niiske puidu alumise kütteväärtuse regressioonanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| puuliik | kate | asukoht | a | b | r ² | standardviga | p-väärtus |
|--------------|-------------|----------|-----------------|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Kuusk | K-ga | P | 3,993832 | -0,000217 | 0,0754 | 0,6296 | 0,2863 |
| Kuusk | K-ga | K | 4,126533 | -0,000348 | 0,1642 | 0,6501 | 0,1066 |
| Kuusk | K-ta | P | 3,742000 | -0,000100 | 0,0116 | 0,7587 | 0,6804 |
| Kuusk | K-ta | K | 3,970785 | -0,000587 | 0,3855 | 0,6160 | 0,0103 |
| Kuusk | K-ga | - | 4,060183 | -0,000283 | 0,1171 | 0,6218 | 0,0475 |
| Kuusk | K-ta | - | 3,852792 | -0,000341 | 0,1286 | 0,7125 | 0,0404 |
| Kuusk | - | - | 3,960249 | -0,000314 | 0,1198 | 0,6718 | 0,0041 |
| Kask | K-ga | P | 4,435981 | -0,000661 | 0,4877 | 0,5635 | 0,0026 |
| Kask | K-ga | K | 3,701818 | -0,000176 | 0,0592 | 0,5800 | 0,3467 |
| Kask | K-ta | P | 3,216245 | -0,000806 | 0,4729 | 0,7035 | 0,0023 |
| Kask | K-ta | K | 3,619812 | -0,000767 | 0,4673 | 0,6773 | 0,0025 |
| Kask | K-ga | - | 4,047830 | -0,000407 | 0,2291 | 0,5990 | 0,0048 |
| Kask | K-ta | - | 3,418029 | -0,000786 | 0,4426 | 0,7066 | <0,0001 |
| Kask | - | - | 3,720606 | -0,000590 | 0,2352 | 0,8394 | <0,0001 |

Kui arvestada ka katte olemasolu ja proovi võtmise kohta, siis statistiliselt oluliseks saab kuuse puhul pidada vaid katteta kuhja keskelt võetud proovide kütteväärtuse muutust ($p=0,0103$). Samas kase raiejäätmete kütteväärtused vähenesid oluliselt ($p < 0,05$) kõikidel võetud proovidel peale proovide, mis võeti katteta virna keskelt. Kõik usaldusväärsed regressioonivalemite parameetrid on esitatud tabelis 8 rasvases kirjastiilis.

Niiskete raiejäätmete alumise kütteväärtuse muutuse kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 17. Valemist on välja jäetud proovi võtmise asukoha olemasolu, sest selle mõju niiskete raiejäätmete alumisele kütteväärtusele ei suudetud tõestada. Joonisel 17 on näha, et kõigi

raiejäätmete kütteväärtus väheneb aja möödudes ning, et kattega raiejäätmete keskmine kütteväärtus on kõrgem kui katteta raiejäätmete kütteväärtus. Samuti on jooniselt näha, et kase kütteväärtuse langus on suurem kui kuuse puhul.



Joonis 17. Niiske puidu alumise kütteväärtuse muutus ladustamisel (K-ta – katteta, K-ga – kattega virnaosa).

Kuivaine alumine kütteväärtus tõusis (joonis 16), aga niiskete raiejäätmete alumine kütteväärtus langes (joonis 17). See, et niiske puidu alumine kütteväärtus ajaga väheneb tuleneb sellest, et ajaga niiskussisaldus raiejäätmete virnades kasvas. Niiskuse tõusu ja kütteväärtuse suhet oli kujutatud ka joonisel 6, kus on näha niiskuse kasvades kütteväärtuse langemine.

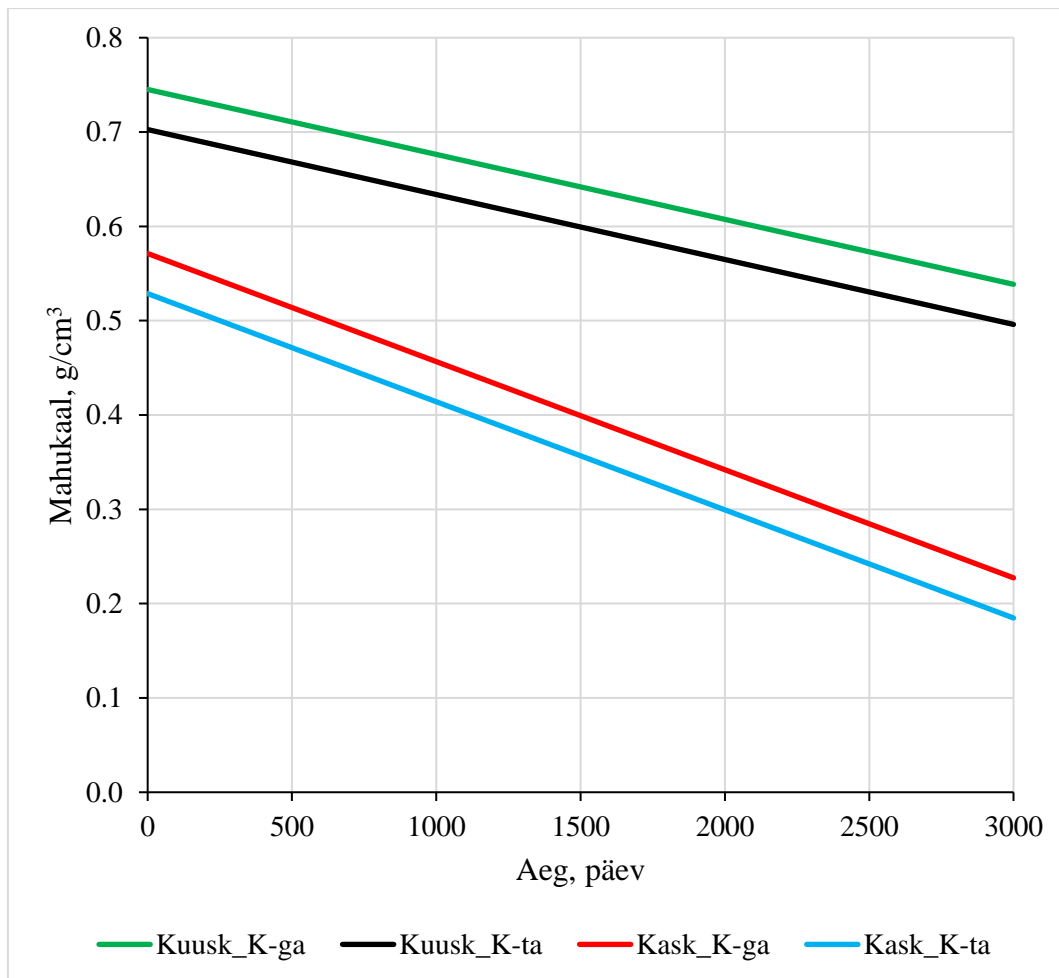
3.4. Mahukaal

Absoluutkuiva mahukaalu ja ladustamisaja vahelise seose uurimiseks kasutati regressioonivalemit 10. Igas analüüsitud grupis oli mahukaalu ja ladustamisaja vahel usaldusväärne seos ($p < 0,05$). Kuuse raiejäätmete mahukaal vähenes päevas $0,000069 \text{ g/cm}^3$ võrra, kase raiejäätmete mahukaal vähenes päevas $0,000115 \text{ g/cm}^3$ võrra. Seega kase mahukaal vähenes ladustamisaja jooksul rohkem kui kuuse oma. Kõige rohkem vähenes mahukaal katteta kase raiejäätmete virna pealmistel proovidel, kus vähenemine oli päevas keskmiselt $0,000137 \text{ g/cm}^3$. Kõige vähem vähenes mahukaal kaetud kuuse virna pealmisest osast võetud proovide puhul – päevas keskmiselt $0,000049 \text{ g/cm}^3$.

Tabel 9. Mahukaalu regressioonanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| Puuliik | Kate | Asukoht | a | b | R ² | Standardviga | p-väärtus |
|---------|------|---------|----------|-----------|----------------|--------------|-----------|
| Kuusk | K-ga | P | 0,718100 | -0,000049 | 0,2540 | 0,0693 | 0,0465 |
| Kuusk | K-ga | K | 0,715500 | -0,000071 | 0,0541 | 0,5419 | 0,0012 |
| Kuusk | K-ta | P | 0,744700 | -0,000065 | 0,4040 | 0,0661 | 0,0081 |
| Kuusk | K-ta | K | 0,717300 | -0,000090 | 0,4962 | 0,0758 | 0,0023 |
| Kuusk | K-ga | - | 0,716800 | -0,000060 | 0,3730 | 0,0622 | 0,0002 |
| Kuusk | K-ta | - | 0,731000 | -0,000078 | 0,4123 | 0,0748 | <0,0001 |
| Kuusk | - | - | 0,723900 | -0,000069 | 0,3897 | 0,0681 | <0,0001 |
| Kask | K-ga | P | 0,589370 | -0,000124 | 0,5238 | 0,0986 | 0,0015 |
| Kask | K-ga | K | 0,576400 | -0,000091 | 0,6468 | 0,0561 | 0,0002 |
| Kask | K-ta | P | 0,508000 | -0,000137 | 0,7808 | 0,0601 | <0,0000 |
| Kask | K-ta | K | 0,525900 | -0,000106 | 0,6344 | 0,0670 | 0,0002 |
| Kask | K-ga | - | 0,582900 | -0,000108 | 0,5433 | 0,0795 | <0,0001 |
| Kask | K-ta | - | 0,516971 | -0,000121 | 0,6742 | 0,0677 | <0,0001 |
| Kask | - | - | 0,549900 | -0,000115 | 0,5411 | 0,0834 | <0,0001 |

Absoluutkuiva mahukaalu muutuse kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 18. Valemist on välja jäetud proovi võtmise asukoha (virna peal/keskel) olemasolu, sest selle mõju niiskete raiejäätmete alumisele kütteväärtusele ei suudetud tõestada.



Joonis 18. Mahukaalu muutus ladustamisaja pikenedes (K-ta – katteta, K-ga – kattega virnaosa).

Jooniselt 18 on näha, et kuuse raiejäätmete mahukaal on kogu ladustamisperioodi jooksul kõrgem kui kase raiejäätmete mahukaal. Kaetud virnades on mahukaal $0,04253 \text{ g/cm}^3$ võrra suurem kui katmata virnades. Jooniselt saab samuti välja lugeda, et kase raiejäätmete mahukaal langeb kiiremini, kui kuuse raiejäätmete mahukaal.

3.5. Energiatihedus

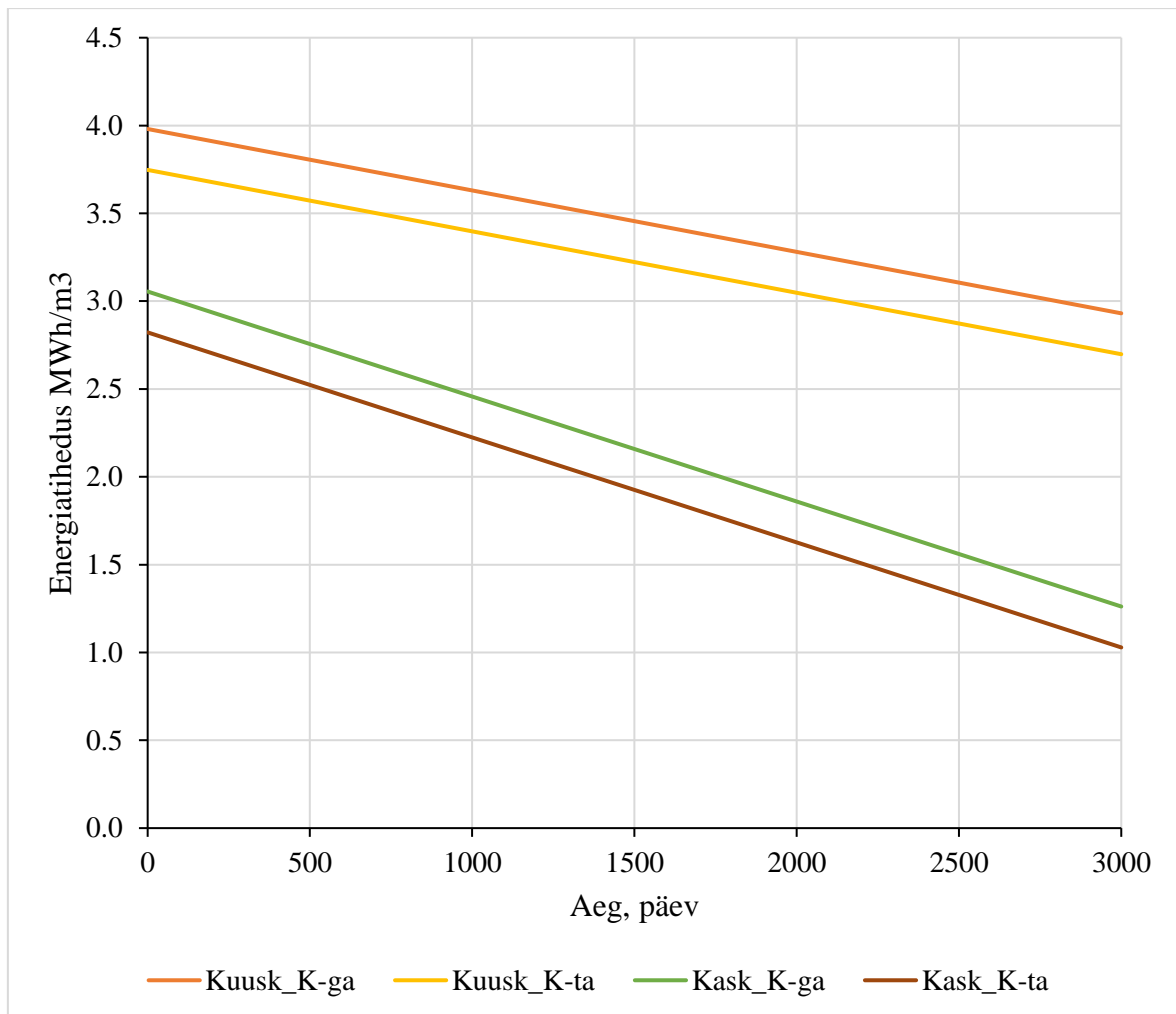
Energiatihedus näitab kütteväärtust mahuühiku kohta. Seega on mahukaalul ja energiatihedusel ladustamisajaga sarnased seosed. Energiatiheduse ja ladustamisaja vahelise seose uurimiseks kasutati regressioonivalemit 10, mille tulemused on toodud tabelis 10. Enamasti on seos energiatiheduse ja aja vahel usaldusväärne ($p < 0,05$). Ainult kaetud kuuse raiejäätmete virna pealt kogutud proovide energiatihedus ei anna ladustamisajaga

usaldusväärset seost ($p = 0,1165$). Tabelist on näha, et kase energiatihedus väheneb päevas keskmiselt $0,000598 \text{ MWh/m}^3$ võrra, sealjuures katteta virna energiatihedus vähenes kiiremini kui katteta virna energiatihedus. Kuuse energiatihedus langeb keskmiselt $0,000350 \text{ MWh/m}^3$ võrra päevas. Ka kuuse puhul on katteta virna energiatiheduse langus suurem kui kattega virnal.

Tabel 10. Energiatiheduse regressioonanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| Puuliik | Kate | Asukoht | a | b | R ² | Standardviga | p-väärtus |
|--------------|-------------|----------|-----------------|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Kuusk | K-ga | P | 3,837046 | -0,000231 | 0,1667 | 0,4300 | 0,1165 |
| Kuusk | K-ga | K | 3,807499 | -0,000348 | 0,4590 | 0,3144 | 0,0039 |
| Kuusk | K-ta | P | 3,974848 | -0,000351 | 0,3940 | 0,3623 | 0,0092 |
| Kuusk | K-ta | K | 3,837162 | -0,000468 | 0,4799 | 0,4050 | 0,0029 |
| Kuusk | K-ga | - | 3,822272 | -0,000290 | 0,2779 | 0,3753 | 0,0019 |
| Kuusk | K-ta | - | 3,906000 | -0,000410 | 0,4066 | 0,3976 | <0,0001 |
| Kuusk | - | - | 3,864000 | -0,000350 | 0,3414 | 0,3838 | <0,0001 |
| Kask | K-ga | P | 3,151610 | -0,000645 | 0,4900 | 0,5436 | 0,0024 |
| Kask | K-ga | K | 3,072000 | -0,000477 | 0,6591 | 0,2852 | 0,0001 |
| Kask | K-ta | P | 2,718090 | -0,000709 | 0,7801 | 0,3128 | <0,0001 |
| Kask | K-ta | K | 2,813600 | -0,000561 | 0,6672 | 0,3292 | 0,0001 |
| Kask | K-ga | - | 3,112000 | -0,000561 | 0,5260 | 0,4277 | <0,0001 |
| Kask | K-ta | - | 2,766000 | -0,000635 | 0,6903 | 0,3414 | <0,0001 |
| Kask | - | - | 2,939000 | -0,000598 | 0,5373 | 0,4383 | <0,0001 |

Energiatiheduse muutuse kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 19. Valemist on välja jäetud proovi võtmise asukoha (virna peal/keskel) olemasolu, sest selle mõju energiatihedusele ei olnud usaldusväärne.



Joonis 19. Energiatiheduse muutus ladustamisaja pikenedes (K-ta – katteta, K-ga – kattega virnaosa).

Joonisel 19 on näha, et kuuse keskmine energiatihedus on kogu ladustamisperioodi jooksul kõrgem, kui kasel (joonis 19). Samuti langeb kuuse energiatihedus aeglasemalt. Kattega raiejäätmete energiatihedus on keskmiselt $0,2329 \text{ MWh/m}^3$ võrra kõrgem, kui katteta raiejäätmetel.

3.6. Niiskusesisaldus

Raiejäätmete niiskusesisalduse seost ladustamisajaga uuriti regressioonivalemiga 10. Saadud tulemused on nähtavad tabelis 11. Usaldusväärsede seostega andmed on tabelis kujutatud rasvase kirjastiiliga. Usaldusväärsed seoseid ladustamisaja ja niiskusesisalduse vahel ei leitud kattega pealt, kattega keskelt ja katteta pealt võetud kuuse raiejäätmete

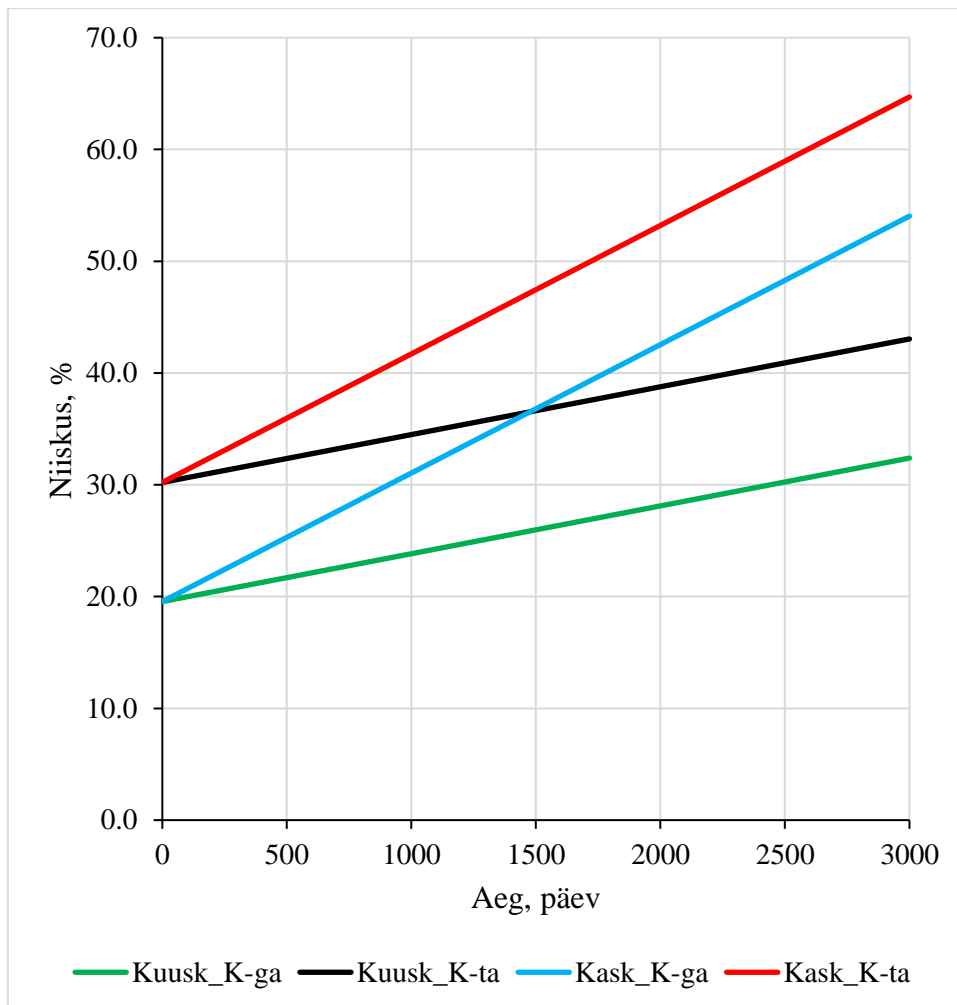
proovide puhul ning kattega pealt ja keskelt kase raiejäätmete proovide puhul. Ülejäänud gruppide puhul saadi ladustamisaja ja energiatiheduse vahel usaldusväärsed seosed.

Tabel 11. Niiskusesisalduse regressioonanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| puuliik | kate | asukoht | a | b | r ² | standardviga | p-väärtus |
|--------------|-------------|----------|------------------|-----------------|----------------|---------------|-------------------|
| Kuusk | K-ga | P | 22,308826 | 0,004104 | 0,0963 | 10,400 | 0,1599 |
| Kuusk | K-ga | K | 19,814109 | 0,006411 | 0,2116 | 10,230 | 0,0632 |
| Kuusk | K-ta | P | 26,445137 | 0,001599 | 0,0107 | 12,690 | 0,6922 |
| Kuusk | K-ta | K | 22,925305 | 0,009953 | 0,3916 | 10,310 | 0,0095 |
| Kuusk | K-ga | - | 21,061467 | 0,005257 | 0,1497 | 10,030 | 0,0238 |
| Kuusk | K-ta | - | 24,730921 | 0,005751 | 0,1288 | 12,000 | 0,0403 |
| Kuusk | - | - | 22,832047 | 0,005539 | 0,1347 | 11,080 | 0,0022 |
| Kask | K-ga | P | 15,206254 | 0,011432 | 0,0019 | 9,351 | 0,5081 |
| Kask | K-ga | K | 26,996925 | 0,003265 | 0,0730 | 9,620 | 0,2941 |
| Kask | K-ta | P | 35,374568 | 0,014152 | 0,5425 | 10,750 | 0,0007 |
| Kask | K-ta | K | 28,670750 | 0,012910 | 0,4642 | 11,470 | 0,0026 |
| Kask | K-ga | - | 21,436557 | 0,007165 | 0,2520 | 9,902 | 0,0029 |
| Kask | K-ta | - | 32,022658 | 0,013530 | 0,4691 | 11,530 | <0,0001 |
| Kask | - | - | 26,936690 | 0,010233 | 0,2522 | 13,900 | <0,0001 |

Niiskusesisalduse muutuse kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 20. Valemist on välja jäetud proovi võtmise asukoha (virna peal/keskel) olemasolu, sest selle mõju niiskusesisaldusele ei suudetud tõestada. Jooniselt 20 on näha, et kaetud raiejäätmete keskmine niiskusesisaldus madalam kui katmata raiejäätmetel. Samuti suurenes kase niiskusesisaldus kiiremini kui kuuse oma.

Katteta virnade niiskusesisaldus ladustamisperioodi ajal oli 10,65% võrra kõrgem kui kaetud virnadel, mis vastab ka varem Soomes läbiviidud uuringutele (Alakangas 2005), kus väideti, et kaetud virnade niiskusesisaldus on 7-10% väiksem kui katmata virnade.

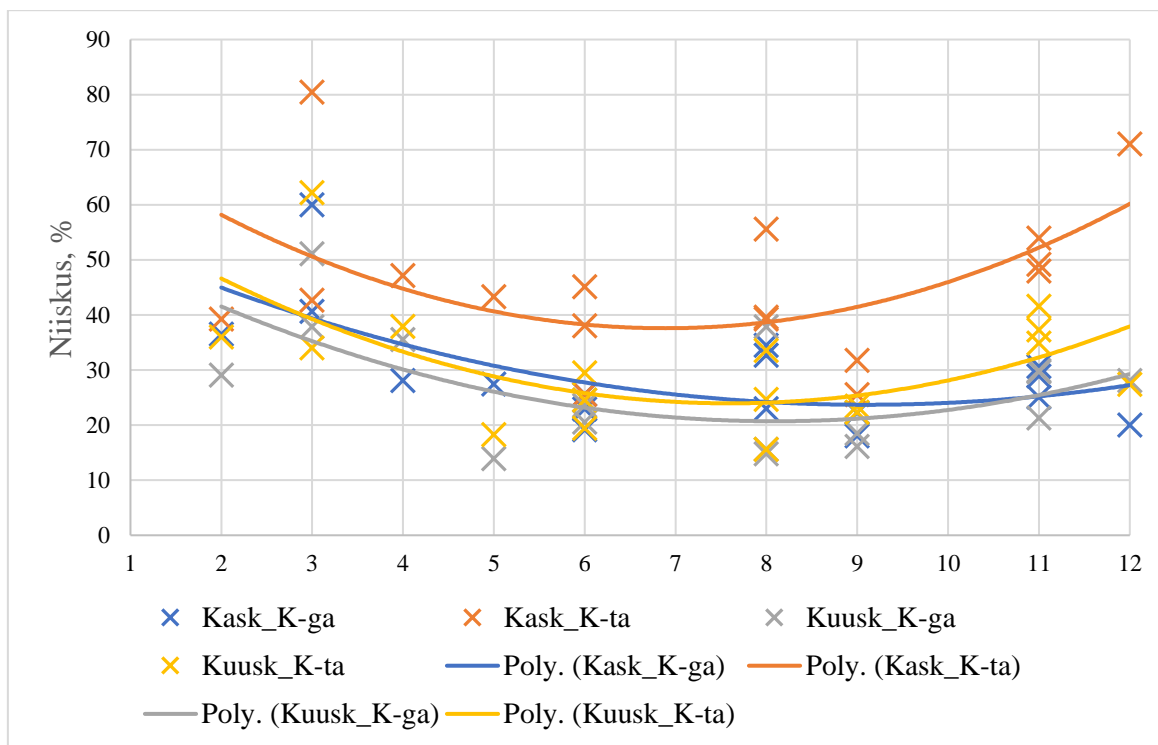


Joonis 20. Niiskusesisalduse seos ladustamisajaga.

Lisaks uuriti veel niiskusesisalduse sõltuvust aastaajast. Selleks teostati regressioonanalüüs, kus uuriti niiskusesisalduse ja kuu numbri vahelist seost. Analüüsil kasutati valemit 11, mille parameetrid on välja toodud tabelis 12 ning regressioonijooned koos algandmetega on kujutatud joonisel 21. Katmata kase raiejäätmete niiskusesisalduse sõltuvust aastaajast (kuu numbrist) ei suudetud tõestada ($p = 0,0967$). Samas kattega kase raiejäätmetel ($p = 0,0235$), kattega kuuse raiejäätmetel ($p = 0,0428$) ning katteta kuuse raiejäätmetel ($p = 0,0407$) on usaldusväärne seos kuu numbriga ehk niiskus muutub aasta jooksul reeglipäraselt. Kui vaadelda kõiki raiejäätmeid korraga, siis on niiskuse muutusel aastaajaga seos oluline ($p = 0,0004$). Jooniselt on näha ka, et mõlema puuliigi kaetud raiejäätmed on katmata jäätmetest madalama niiskusesisaldusega.

Tabel 12. Valemi 11 parameetrid ja karakteristikud

| Proov | a_0 | a_1 | a_2 | p-väärtus | Standardviga | R^2 |
|-------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Kask_K-ga | 58,654 | -7,687 | 0,423 | 0,0235 | 8,289 | 0,415 |
| Kask_K-ta | 78,481 | -11,882 | 0,863 | 0,0967 | 12,862 | 0,284 |
| Kuusk_K-ga | 57,448 | -9,080 | 0,561 | 0,0428 | 8,637 | 0,363 |
| Kask_K-ta | 65,693 | -10,981 | 0,722 | 0,0407 | 9,484 | 0,367 |



Joonis 21. Niiskusesisalduse muutused kuude kaupa.

Jooniselt selgub, et suvekuudel, kui sademeid on vähem ning ilmad on soojemad, langeb ka raiejäätmete niiskusesisaldus. Kasutades regressioonivalemit 11 koos konstantidega tabelist 12 on võimalik välja arvutada iga kuu kohta niiskused näitajate prognoosid. Kuna proove ei võetud jaanuaris, siis antud valemit jaanuari puhul kasutada ei saa ning võib kasutada jaanuari puhul veebruari või detsembri tulemusi.

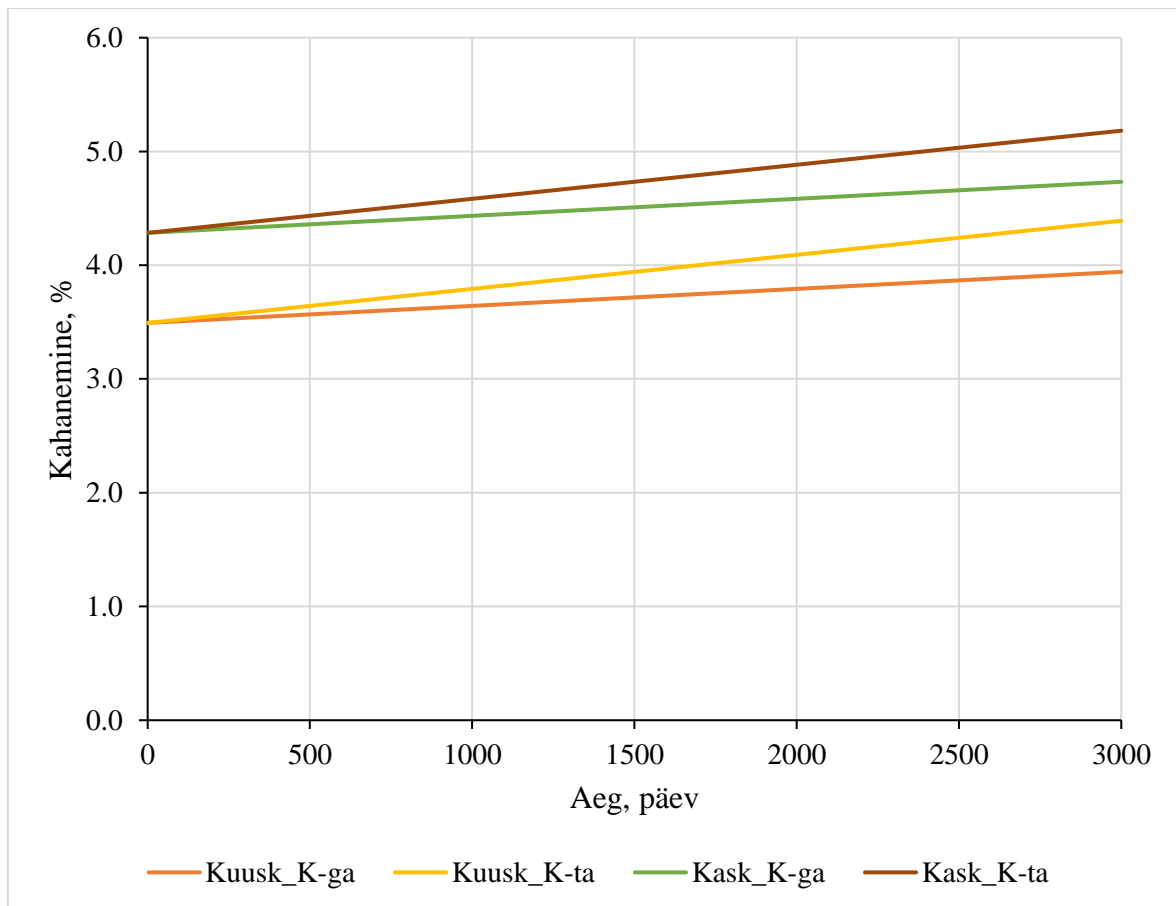
3.7. Diameetri kuivamiskahanemine

Diameetrite kuivamiskahanemise seost ladustamisajaga uuriti regressioonivalemi 10 abil. Regressioonanalüüsi tulemused on esitatud tabelis 13. Kui arvestada kõiki tegureid: puuliiki, proovi võtmise asukohta ja katte olemasolu, siis oluliseks saab lugeda vaid kattega kuuse virna keskelt võetud raiejäätmete kahanemise muutust ($p = 0,0231$). Teistest kohtadest võetud proovide diameetri kuivamiskahanemise seost ajaga ei suudetud tõestada ($p > 0,05$).

Tabel 13. Diameetri kuivamiskahanemise regressioonanalüüsi parameetrid ja karakteristikud

| Puuliik | Kate | Asukoh t | a | b | R ² | Standardvig a | p-väärtus |
|--------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|---------------|
| Kuusk | K-ga | P | 3,571000 | 0,000062 | 0,0016 | 1,3080 | 0,8840 |
| Kuusk | K-ga | K | 3,106984 | 0,000690 | 0,3172 | 0,8414 | 0,0231 |
| Kuusk | K-ta | P | 3,824223 | -0,000413 | 0,1135 | 0,9597 | 0,2020 |
| Kuusk | K-ta | K | 3,422781 | 0,000602 | 0,2228 | 0,9340 | 0,0649 |
| Kuusk | K-ga | - | 3,338777 | 0,000376 | 0,0706 | 1,0960 | 0,1417 |
| Kuusk | K-ta | - | 3,624000 | 0,000094 | 0,0051 | 1,0590 | 0,6979 |
| Kuusk | - | - | 3,481140 | 0,000235 | 0,0295 | 1,0660 | 0,1747 |
| Kask | K-ga | P | 4,406683 | -0,000214 | 0,0199 | 1,2470 | 0,6020 |
| Kask | K-ga | K | 5,031386 | -0,000596 | 0,1979 | 0,9974 | 0,0843 |
| Kask | K-ta | P | 3,854839 | 0,001444 | 0,2214 | 2,2510 | 0,0659 |
| Kask | K-ta | K | 4,349306 | -0,000217 | 0,0299 | 1,0290 | 0,5218 |
| Kask | K-ga | - | 4,719034 | -0,000405 | 0,0794 | 1,1070 | 0,1183 |
| Kask | K-ta | - | 4,102072 | 0,000613 | 0,0612 | 1,9290 | 0,1721 |
| Kask | - | - | 4,410553 | 0,000104 | 0,0026 | 1,6150 | 0,6893 |

Diameetri kuivamiskahanemise muutumise kirjeldamiseks kasutati dispersioonanalüüsil saadud tulemusi (peatükk 3.1). Vastavad tulemused on esitatud joonisel 22. Valemist on välja jäetud proovi võtmise asukoha (virna peal/keskel) olemasolu, sest selle mõju raiejäätmete kuivamiskahanemisele ei suudetud tõestada.



Joonis 22. Raiejäätmete diameetrite kuivamiskahanemine ladustamisaja jooksul.

Joonisel 22 on näha, et raiejäätmete diameetri kuivamiskahanemine suureneb. Lehtpuu raiejäätmete diameetrite kahanemise % oli suurem, kui okaspuu raiejäätmetel. Jooniselt selgub ka, et mõlema puuliigi kaetud virnades olnud jäätmete diameetrite kahanemine oli väiksem, kui katmata virnades olnud jäätmetel.

3.8. Kahanemise ja niiskuse muutused

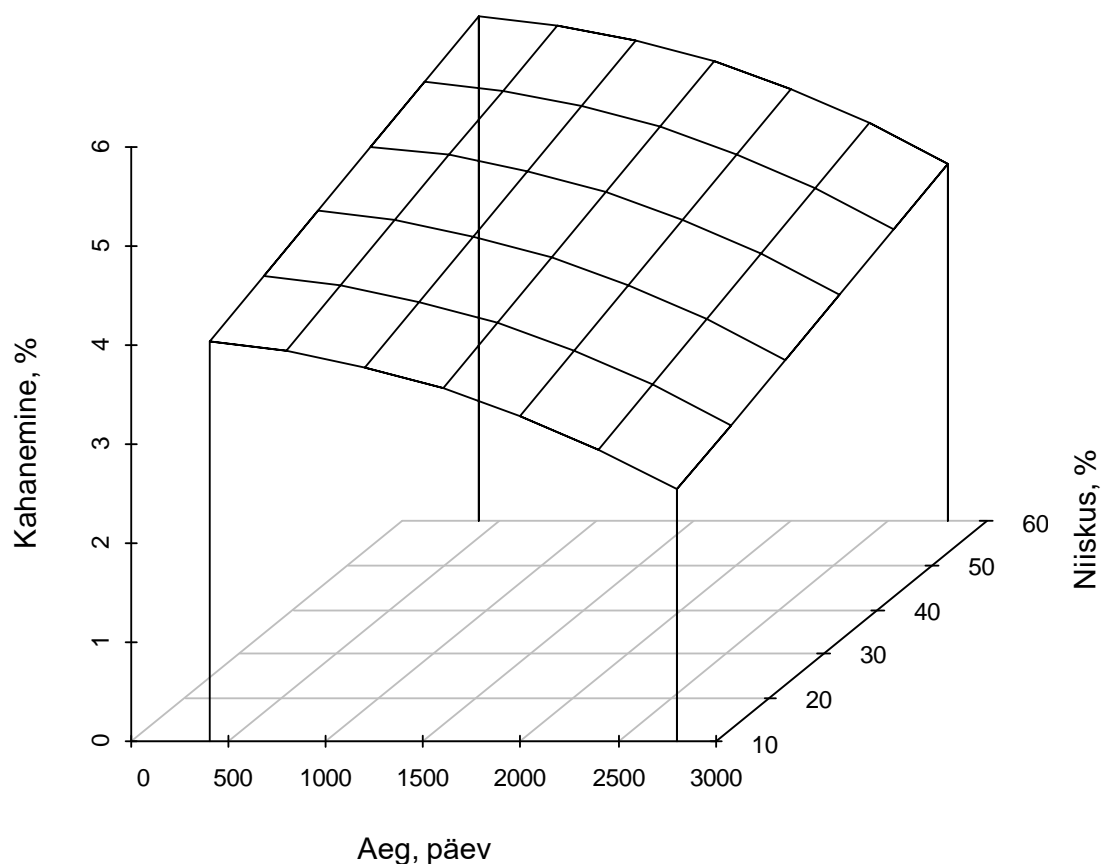
Töö käigus uuriti ka kahanemise ja niiskusesisalduse muutusi üheskoos. Selleks kasutati mitmest regressiooni, kusjuures kuuse andmete korral kasutati valemit 12 ning kase andmete puhul valemit 13. Valemite kordajad ja olulisuse tõenäosused on välja toodud tabelis 14. Samuti kontrolliti regressioonanalüüsil saadud mudeli prognoosijääkide vastavust normaaljaotusele, milleks kasutati *Shapiro-Wilk*'i testi. Kase mudeli jääkide normaaljaotuse testi olulisuse tõenäosuseks saadi 0,1019 ning kuuse mudeli jääkide olulisuse tõenäosuseks

saadi 0,7444. Mõlemad p-väärtuse tulemused on üle 0,05, mis näitab, et jäägid sobivad normaaljaotusega.

Tabel 14. Valemite 12 ja 13 kordajad ja nende olulisusetõenäosused

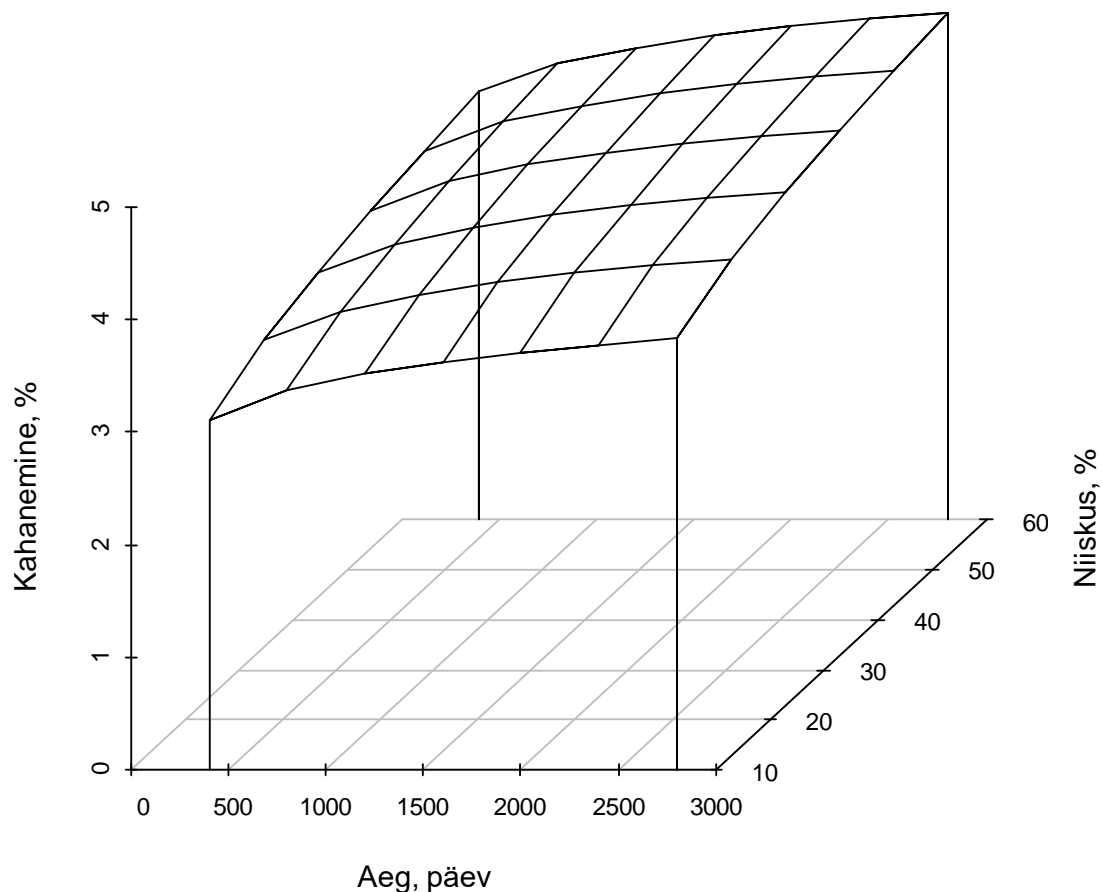
| Puuliik | Kordaja | Kordaja väärtus | p-väärtus |
|---------|---------|-------------------------|-----------|
| Kask | a_0 | 3,851 | <0,0001 |
| | a_1 | 0,02156 | 0,0432 |
| | a_2 | $3,572 \cdot 10^{-283}$ | <0,0001 |
| | a_3 | $-1,944 \cdot 10^{-7}$ | 0,0175 |
| Kuusk | a_1 | 0,15284 | <0,0001 |
| | a_2 | 0,37387 | <0,0001 |

Regressioonanalüüsil leitud mudeli visuaalseks kujutamiseks koostati vastavalt kase ja kuuse raiejäätmete kohta joonised 23 ja 24. Jooniselt 23 on näha, et kase raiejäätmete diameetrite kuivamiskahanemise protsent ladustamise ajal väheneb, kusjuures algul on vähenemine aeglane ning aja möödudes muutub kiiremaks. Jooniselt on näha ka, et niiskuse kasvades kuivamiskahanemine suureneb lineaarselt.



Joonis 23. Kase raiejäätmete diameetri kahanemise ja niiskuse muutus ladustamisajal.

Kuuse korral tuli välja hoopis vastupidine tulemus, et mida aeg edasi seda suuremaks muutub diameetrite kuivamiskahanemine (joonis 24). Algul muutub kahanemine kiiremini, hiljem muutuse kiirus väheneb (trend on kumer). Samuti on joonisel näha, et niiskusesisalduse kasvades diameetrite kuivamiskahanemine suureneb.



Joonis 24. Kuuse raiejäätmete diameetri kahanemise ja niiskuse muutus ladustamisajal.

Kahanemise erinevusi kase ja kuuse vahel võib seletada puuliikide erinevate omadustega, sest on teada, et kahanemist mõjutavad proovikehade mõõtmed, kuivamise kiirus ja tihedus (Bowyer *et al.* 2003). Kase puhul on kuivamiskahanemise vähenemine seletatav tiheduse vähenemisega, sest on teada, et tihedamal puidul on kuivamiskahanemine suurem kui väiksema tihedusega puidul (Saarman ja Veibri 2006). Raske on aga seletada kuuse raiejäätmete kuivamiskahanemise tõusu, sest ka kuuse raiejäätmete tihedus ladustamise käigus vähenes.

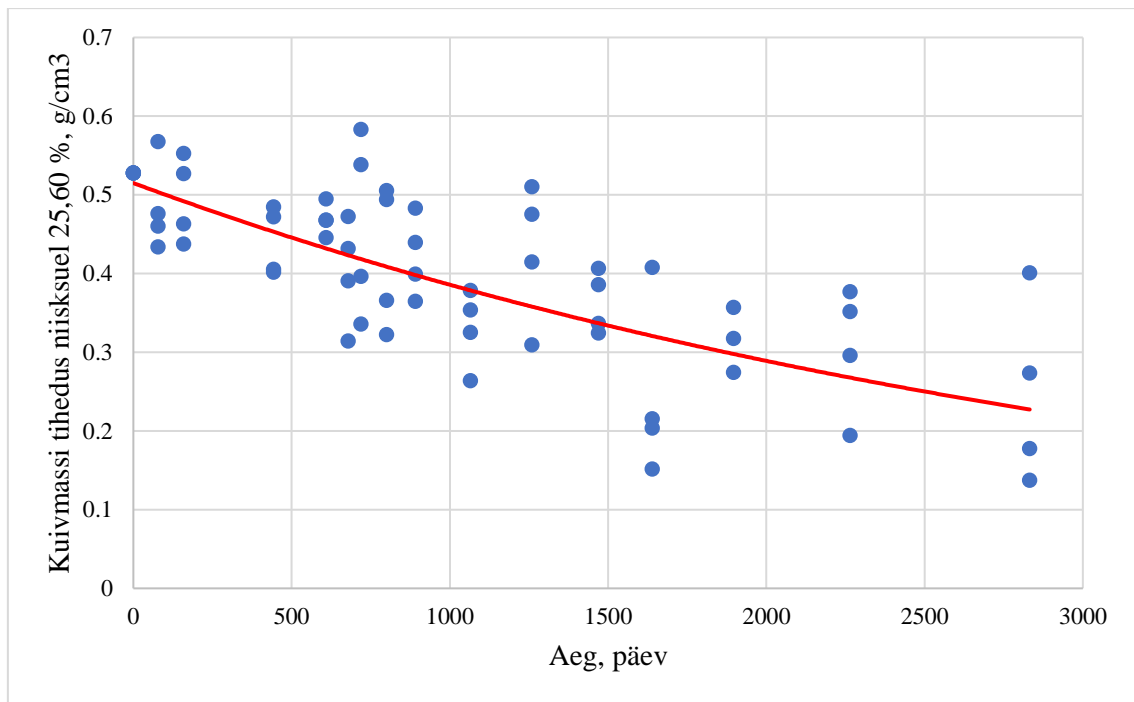
3.9. Puidu kadu

Töö põhieesmärgiks oli leida ladustamisel tekkiva puidu koguse ja energiasisalduse vähenemine. Et leida puidu koguste kadu, oli esmalt vaja taandada kõikide proovide kuivamiskahanemised samale niiskusele. Niiskustasemeks valiti raiejäätmete virnade loomisel leitud materjalide niiskused. Kase raiejäätmete puhul kasutati baasniiskuseks 25,60% ning kuuse puhul 24,53%. Kuivamiskahanemise leidmiseks baasniiskusele kasutati alapeatükis 3.8 loodud mudeleid. Saadud kahanemiste järgi leiti proovide suhteline maht valemiga 14. Järgnevalt arvutati kuivainemass algniiskuste juures olevas ruumalas. Selleks jagati valemiga 14 leitud ruumalaga proovikehade absoluutkuiva tihedusega. Lõpuks teostati regressioonanalüüs leidmaks seos puidu massi ja ladustamisaja vahel. Regressioonanalüüsil kasutati järgnevat valemit 16. Valemi tulemused ja parameetrid on toodud tabelis 15. Regressioonanalüüsi järgselt kontrolliti Shapiro-Wilk'i testiga jääkide vastavust normaaljaotusega. Testi tulemusena leitud olulisuse tõenäosused tulid kuusel 0,5534 ning kaskel 0,1384. Kuna mõlema puuliigi puhul on $p > 0,05$, siis võib väita, et jäägid sobivad normaaljaotusega. Kase ja kuuse raiejäätmete massi kao regressioonijooned koos algandmetega on kujutatud vastavalt joonistel 25 ja 26.

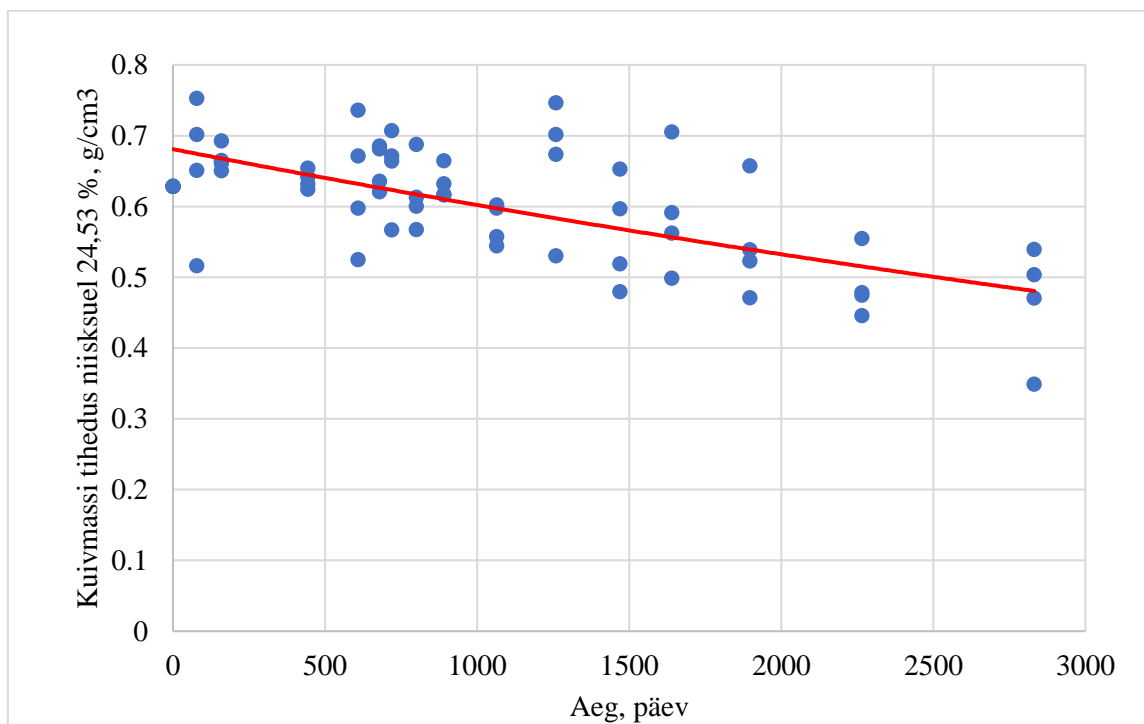
Tabel 15. Orgaanilise aine kao regressiooni valemi parameetrid ja tulemused

| Puuliik | a_0 | a_1 | p-väärtus | Standardviga | R^2 |
|---------|----------|-----------|-----------|--------------|--------|
| Kuusk | 0,680958 | -0,000123 | <0,0001 | 0,1095 | 0,4406 |
| Kask | 0,514994 | -0,000289 | <0,0001 | 0,2273 | 0,5014 |

Jooniselt 25 on näha, et kase kuivamassi tihedus ladustamisaja pikenedes väheneb. Samuti väheneb ka kuuse kuivmassi tihedus (joonis 26), kuid aeglasemalt, kui kase oma.



Joonis 25. Kase raiejäätmete orgaanilise aine kadu.



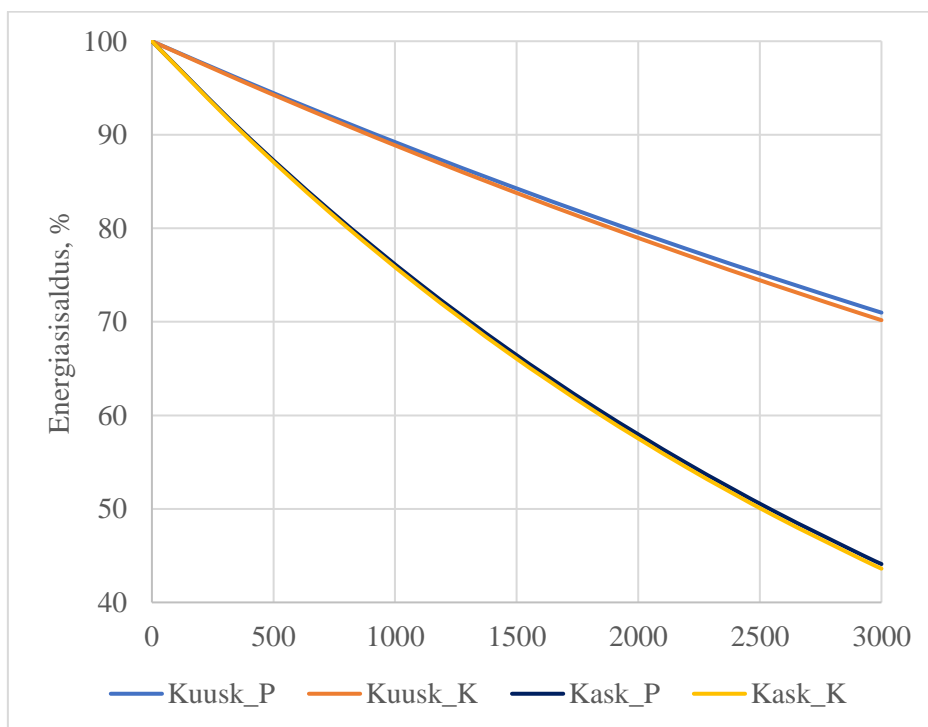
Joonis 26. Kuuse raiejäätmete orgaanilise aine kadu.

Kuuse raiejäätmete puhul on kaheksanda aasta lõpuks kuivmassi tihedus niiske massi mahuühiku kohta langenud esialgselt $0,681 \text{ g/cm}^3$ -lt kuni $0,471 \text{ g/cm}^3$ -ni ehk järgi on jäänud

massist 69,1%. Kase puhul on olnud sama aja jooksul kadu tunduvalt suurem – 0,515 g/cm³-lt kuni 0,217 g/cm³-ni ehk esialgselt materjalist alles vaid 42,0%.

3.10. Energiasisalduse muutus raiejäätmetes

Kuna raiejäätmete ladustamisel toimub nii massi muutumine, kui ka kütteväärtuse muutumine, siis neid suurusid koos analüüsidest leiti ka energiasisalduse muutumine algniiskuste juures. Alapeatükis 3.3.1 on toodud alumise kütteväärtuse muutumise analüüs, kus selgus, et kütteväärtus massiühiku kohta ladustamisel tõuseb. Alapeatükis 3.9 on arvutatud raiejäätmete massi muutus ladustamisel. Kui alumine kütteväärtus korrutada tihedusega, saadakse kütteväärtus mahuühiku kohta. Edasisel analüüsil teisendati energiahulgad protsentidesse, kusjuures 100% võeti raiejäätmete virnade loomise ajal olev energiasisaldus. Joonisel 27 on kujutatud suhteline energiahulga muutumine ladustamisaja jooksul.



Joonis 27. Energiasisalduse muutumine ladustamisaja jooksul (virna peal – P, virna keskel – K).

Joonisel ei ole välja, kas proov oli kattega või katteta virnast, sest alumise kütteväärtuse analüüsil selgus, et nende vahel ei olnud olulist erinevust. Energiasisalduse vähenemine virnade peal ja keskel on sarnane (joonis 27). Kuna pealmist osa on virnal suhteliselt vähe võrreldes keskmise osaga, siis arvutati välja iga aasta möödudes protsentuaalne energiasisaldus raiejäätmete virna keskosas (tabel 16).

Tabel 16. Virna keskel asuvate raiejäätmete energiasisaldus aastate kaupa

| Aasta | Kuusk | Kask |
|-------|-------|-------|
| 0 | 100,0 | 100,0 |
| 1 | 95,8 | 90,4 |
| 2 | 91,7 | 81,7 |
| 3 | 87,9 | 73,9 |
| 4 | 84,2 | 66,8 |
| 5 | 80,6 | 60,4 |
| 6 | 77,2 | 54,5 |
| 7 | 73,9 | 49,3 |
| 8 | 70,8 | 44,6 |

Tabelis 16 saadud andmeid võib pidada töö põhieesmärgiks. Selle tabeli järgi saab näha kui palju energiat puidu lagunemise tõttu igal aastal ära kaob. Kui alguses oli kõigi raiejäätmete energiasisaldus 100%, siis pärast aastast seismist oli kuuse raiejäätmete energiasisaldus oli langenud 95,8% -ni. Kase raiejäätmete energiasisaldus oli sama ajaga langenud 90,40% -ni. Iga aastaga, mil raiejäätmeid ladustatakse, virna energiasisaldus väheneb ning näiteks kaheksanda aasta möödudes on virna energiasisaldus võrreldes esialgsega kuuse raiejäätmete puhul 70,8% ning kase raiejäätmete puhul 44,6%. Kase raiejäätmete energiasisaldus langes alla poole juba seitsmendal ladustamisaastal.

Seega võiks raiejäätmete müüjatele soovitada hoida tooreid raiejäätmeid virnas vaid kuivatamiseks ning pärast virna kuivamist (üks suveperiood) need võimalikult kiiresti töödelda hakkpuiduks ning suunata tarbimisse.

KOKKUVÕTE

Raiejäätmete kõige olulisemaks omaduseks on niiskusesisaldus, sest kõik teised omadused on suuremal või vähemal määral niiskusesisaldusest mõjutatud. Käesolevas töös tuli välja, et raiejäätmete niiskusesisaldus kaetud virnades oli 10,65% väiksem, kui katmata virnades.

Oluline mõju ladustamisaja ja tuhasisalduse vahel leiti vaid kasele, kuuse puhul seda tõestada ei suudetud. Kase raiejäätmetel esines ladustamisperioodi jooksul tuhasisalduse tõus, samas kuuse raiejäätmete tuhasisaldus pigem langes. Üldiselt võib öelda, et tuhasisaldus ei sõltu ladustamisaja pikkusest.

Kuivaine alumise kütteväärtuse ja ladustamisaja vaheline seos tõestati ära nii kase, kui ka kuuse puhul. Kuusel esines usaldusväärne seos kattega raiejäätmetel, kasel nii kattega kui ka katteta raiejäätmetel. Kase raiejäätmete kütteväärtused tõusid ladustamisaja jooksul rohkem, kui kuuse omad. Nii kuuse, kui kase virnade pealmiste raiejäätmete alumine kütteväärtus tõusis rohkem kui virnade keskel olevate raiejäätmete kütteväärtus. Alumise kütteväärtuse tõusu põhjuseks, on hemitselluloosi ja tselluloosi lagunemine, mille tõttu kõrgema kütteväärtusega ligniini osakaal suureneb.

Kui arvestada kütteväärtusel ka materjali niiskust, siis esines kütteväärtuse langus nii kuusel, kui kasel. Kaetud raiejäätmete kütteväärtus oli kogu ladustamisperioodi jooksul keskmiselt 0,644 MWh/t suurem, kui katmata raiejäätmete kütteväärtus. Kui kuivaine alumine kütteväärtus tõusis kasel kiiremini kui kuusel, siis niiske kütuse alumine kütteväärtus langeb kasel kiiremini kui kuusel.

Mahukaalu vähenemise ja ladustamisaja vahel oli oluline seos igast kohast võetud proovidel, samas kattega ja katteta raiejäätmete mahukaalu erinevust statistiliselt oluline ei olnud. Kaetud virnades oli ladustamisperioodi jooksul mahukaal keskmiselt 0,04253 g/cm³ võrra suurem. Selgus, et kase raiejäätmete mahukaal langes kiiremini kui kuuse oma.

Kase energiatihedus vähenes päevas keskmiselt 0,000598 MWh/m³ võrra ning kuuse energiatihedus vähenes päevas keskmiselt 0,00035 MWh/m³ võrra. Kuuse raiejäätmete energiatihedus vähenes aeglasemalt, kui kase oma, sealjuure mõlema puuliigi katteta raiejäätmete energiatihedus oli väiksem, kui kaetud raiejäätmete energiatihedus.

Niiskusesisaldus tõusis kogu ladustamisperioodi jooksul, sealjuures kaetud virnades oli niiskusesisaldus keskmiselt 10,65% madalam, kui katmata virnades. Töös tuli välja ka see, et suvekuudel oli niiskusesisaldus madalam, kui talvekuudel.

Diameetrite kahanemisel oli oluline seos ladustamisajaga. Kase raiejäätmete diameetrite kahanemine oli suurem, kui kuuse diameetrite kahanemine, sealjuures kaetud raiejäätmetel oli kahanemine väiksem, kui katmata raiejäätmetel.

Kahanemist uuriti veel ka koos niiskusega. Kase diameetrite kuivamiskahanemise protsent väheneb ladustamise käigus. Ladustamise alguses on vähenemine aeglane ning aja möödudes muutub kiiremaks. Niiskuse kasvades kuivamiskahanemine suureneb lineaarselt. Kuuse diameetrite kahanemise muutus on vastupidine, alguses kiirem ning hiljem aeglasem. Niiskuse kasvades kuuse diameetrite kuivamiskahanemine suureneb. Kase kuivamiskahanemise vähenemist saab seletada tiheduse muutusega, sest tihedam puit kuivab reeglina rohkem kokku kui väiksema tihedusega puit. Põhjust, miks kuuse raiejäätmete kuivamiskahanemine tõusis, on keeruline seletada, sest ka kuuse raiejäätmete tihedus ladustamise käigus vähenes.

Kase raiejäätmed kaotavad ladustamisperioodi jooksul rohkem orgaanilist ainet, kui kuuse raiejäätmed. Kuuse raiejäätmete puhul on kaheksanda aasta lõpuks kuivmassi tihedus niiske massi mahuühiku kohta langenud esialgselt $0,681 \text{ g/cm}^3$ -lt $0,471 \text{ g/cm}^3$ -ni ehk järgi on jäänud massist 69,1%. Kase puhul on olnud sama aja jooksul kadu märkimisväärselt suurem – $0,515 \text{ g/cm}^3$ -lt $0,217 \text{ g/cm}^3$ -ni ehk esialgsest materjalist on alles vaid 42,0%.

Kuna energiasisaldus sõltub suuresti massist, siis väheneb ladustamise ajal ka energiasisaldus. Kase raiejäätmete energiasisaldus langeb märkimisväärselt kiiremini, kui kuuse raiejäätmete energiasisaldus. Ladustamisperioodi lõpus olid kase energiasisaldused virna peal ja keskel vastavalt 44,10% ja 44,61% algsest energiasisaldusest. Kuuse energiasisaldused peal ja keskel olid samal ajal 70,98% ja 70,18%. Nende andmete põhjal võib soovitada, et raiejäätmed tuleks pärast virna kuivamist (üks suveperiood) võimalikult kiiresti töödelda hakkpuiduks ning suunata tarbimisse.

KASUTATUD KIRJANDUS

Aastaraamat mets 2016. (2017). Tallinn: Keskkonnaagentuur. lk 293.

Agora Energiewende and Sandbag (2018). The European Power Sector in 2017. State of Affairs and Review of Current Developments. pp 52.

Alakangas, E. (2005). Properties of wood fuels used in Finland, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05, Jyväskylä. pp 104 .

***Alexander, J.** (1994). Wood Fuel Standards. ETSU Report No. B/W3/00161/REP. Viidatud: **Hoyne, S., Thomas, A.** (2001). Forest residues: Harvesting, storage and fuel value. pp 32. vahendusel.

***Andersson, G., Askiainen, A., Björheden, R., Hall, P.W., Hudson, J.B., Jirjis, R., Mead, J., Nurmi, J., Weetman, G.F.** (2002). Production of forest energy. *In Bioenergy from Sustainable Forestry—Guiding Principles and Practice*; Richardsson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T., Smith, C.T., Eds.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Netherlands, pp. 49–124. viidatud: **Nilsson, B.** (2016). Extraction of logging residues for bioenergy – effects of operational methods on fuel quality and biomass losses in the forest. Doctoral dissertation, Department of Forestry and Wood Technology, Linnaeus University Press. pp 122. Vahendusel.

AS Tartu Jõujaam. (2018). Kütuse ost-müük 2018. [veebileht]

http://www.fortumtartu.ee/page.php?lang=1&action=show_page&page_id=48

Bosch AXT 2500 HP kasutusjuhend. [veebileht]
<https://www.manualslib.com/manual/1126435/Bosch-Axt-2500-Hp.html> (13.05.2018)

Bowyer, J.L., Shmulsky, R., Haygreen, J.G. (2003). Forest Products and Wood Science: An Introduction Fourth edition. USA: Iowa State University Press.

CEN/TS 15296. Solid biofuels – Calculation of analyses to different bases. European Committee for Standardization (2006).

Crawley, M.J. (2007). The R Book. -John Wiley and Sons Ltd. pp 942 .

De Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S., A. Olsson, B. (2016). Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? -*Forest Ecology and Management*. Volume 383. pp 3-16.

Eesti metsanduse arengukava aastani 2020. (2010). Tallinn. [veebileht]
http://www.envir.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/mak2020vastuvoetud.pdf

Energiamajanduse arengukava aastani 2030. (2016). ENMAK 2030. [veebileht]
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/f/f9/ENMAK_2030._Eelnõu_10.10.2016.pdf

- Erametsakeskus. (2013). Hakkepuidu kasutamine järjest kasvab. [veebileht]
<http://www.eramets.ee/metsandusuudised/hakkepuidu-kasutamine-jarjest-kasvab/>
- Euroopa Liidu Teataja. (2009). Euroopa Parlamendi ja Nõukogu 2009/28/EÜ, taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta ning direktiivide 2001/77/EÜ ja 2003/30/EÜ muutmise ja hilisema kehtetuks tunnistamise kohta. lk16-62.
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:et:PDF>
 (13.05.2018)
- EVS-EN 18134-2. Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method. Eesti Standardikeskus. (2017).
- EVS-EN ISO 18122. Solid biofuels - Determination of ash content. Eesti Standardikeskus. (2015).
- EVS-EN ISO 18125. Solid biofuels - Determination of calorific value. Eesti Standardikeskus (2017).
- *Filbakk, T., Høibø, O.A., Dibdiakova, J., Nurmi, J.** (2011). Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy. -*Scandinavian Journal of Forest Research*. 26, pp 267–277. viidatud: **Nilsson, B., Nilsson, D., Thörnqvist, T.**(2015). Distributions and Losses of Logging Residues at Clear-Felled Areas during Extraction for Bioenergy: Comparing Dried- and Fresh-Stacked Method.*Forests*. 6, pp 4212-4227. vahendusel.
- Hoyne, S., Thomas, A.** (2001). Forest residues: Harvesting, storage and fuel value. pp 32.
- Huhtinen, M.** (2006). Wood biomass as a fuel. Finland. [veebileht]
https://www.hnee.de/_obj/CD8F42A0-B396-40E7-9F36-FF60A55DEFF7/outline/5Eures_-WoodPropertiesPDF.pdf
- Järve, I., Kass, M., Külvik, M., Lorenz, A., Maasikamäe, S., Mikita, V., Pallav, V., Roosmaa, Ü.** (2017). Lõputöö vormisamise nõuded. Tartu. lk 50.
- Kizha, A., Han, H.** (2017). Moisture Content in Forest Residues: an Insight on Sampling Methods and Procedures. -*Current Forestry Reports*. 3. pp 202–212.
- *Kytö, M., Äijälä M., Panula, E.** (1983). Metsäenergia käyttö ja jalostus. Osa 8. Puun ominaisuudet ja nergikäyttö. Kirjallisuustutkimus. (Use and upgrading of wood energy. Vol 8. Wood properties and energy use. Literature study). Espoo. VTT, Reasearch Notes 237. pp 146. Viidatud: **Alakangas, E.** (2005). Properties of wood fuels used in Finland, Technical Reasearch Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05, Jyväskylä. pp 104. vahendusel.
- Lõhmus, K., Ivask, M., Tamm, Ü., Vares, A., Tamm, U.** (2000). Arukase (*Betula pendula* Roth.), sookase (*Betula pubescens* Ehrt.), sanglepa (*Alnus glutinosa* (L.) Gaerten.) ja haava (*Populus tremula* L.) tüve kalorsus Eestis. – Metsanduslikud uurimused XXXII, lk. 113120.
- Nilsson, B.** (2016). Extraction of logging residues for bioenergy – effects of operational methods on fuel quality and biomass losses in the forest. Doctoral dissertation, Department of Forestry and Wood Technology, Linnaeus University Press. pp 122.

- Nilsson, B., Blom, Å, Thörnqvist, T.** (2013). The influence of two different handling methods on the moisture content and composition of logging residues. *biomass and bioenergy* 52. pp 34-42.
- Nilsson, B., Nilsson, D., Thörnqvist, T.** (2015). Distributions and Losses of Logging Residues at Clear-Felled Areas during Extraction for Bioenergy: Comparing Dried- and Fresh-Stacked Method.- *Forests*. 6, pp 4212-4227.
- Nilsson, D., Nilsson, B., Thörnqvist, T., Bergh, J.** (2018). Amount of nutrients extracted and left behind at a clear-felled area using the fresh-stacked and dried-stacked methods of logging residue extraction, -*Scandinavian Journal of Forest Research*, DOI: 10.1080/02827581.2018.1427786
- *Nurmi, J.** (1993). Pienkokoisten puiden maanpäällisen biomassan lämpöarvo. (Calorific value of surficial biomass of small trees). -*Acta Forestalia Fennica* 236. 30p. viidatud: **Alakangas, E.** (2005). Properties of wood fuels used in Finland, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05, Jyväskylä. pp 104. vahendusel.
- *Nurmi, J.** (1999). hakkuutähteen ominaisuuksista. (On properties of wood chips). Forest Research Institute, Research Papers 758. 42 p. viidatud: **Alakangas, E.** (2005). Properties of wood fuels used in Finland, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05, Jyväskylä. pp 104. vahendusel.
- Nurmi, J.** (1999). The storage of logging residue for fuel. *Biomass & Bioenergy - BIOMASS BIOENERG.* 17. 41-47. 10.1016/S0961-9534(99)00023-9.
- OÜ Utilitas (2018). OÜ Utilitas Tallinna Elektri jaam korraldab läbirääkimistega hanke puiduhakke ostuks OÜ Utilitas Tallinna Elektri jaama ja AS Utilitas Eesti katlamajade tarbeks. [veebileht] <https://www.utilitas.ee/wp-content/uploads/2018/04/Utilitase-hanke-kutse-dokumentatsioon-2018-2019.pdf>. (25.05.2016).
- Puitkütuste ja puitkütuseks sobiliku toorme kasutus Eestis, lõpparuanne. (2013). /Koost. Tallinna Tehnikaülikool, Eesti Maaülikool. Tallinn-Tartu. lk 164.
- Riigimetsa Majandamise Keskus. (2018a). Hakkpuidu müük. [veebileht] <http://www.rmk.ee/puidumuuk-1/puidumuuk/hakkpuit>
- Riigimetsa Majandamise Keskus. (2018b). Raidmete müük. [veebileht] <http://www.rmk.ee/puidumuuk-1/puidumuuk/raidmed>
- Röser, D., Asikainen, A., Raulund-Rasmussen, K., Stupak, I.** (2008). Sustainable Use of Forest Biomass for Energy: A Synthesis with Focus on the Baltic and Nordic Region. Springer Science & Business Media, 5.pp 261. <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4020-5054-1>
- Saarman, E., Veibri, U.** (2006). Puiduteadus. Tartu: Eesti metsaselts. lk 521.
- Savi, H.** (2010). Pikaajalise ladustamise mõju kase küttepuidu mahumassile ja kõvadusele. Magistriöö loodusteaduste magistrikraadi taotlemiseks loodusvarade kasutamise ja kaitse erialal. Tartu, lk 88.

- Serup, H., Kofman, P. D., Falster, H., Gamborg, C., Gundersen, P., Hansen, L., Heding, N., Houmann Jakobsen, H., Nikolaisen, L., M. Thomsen, I., O'Carroll, J.** (2005). Wood for Energy Production, Irish edition. COFORD, Dublin [veebileht] http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/wood_for_energy_production.pdf
- Statistikaamet (2018). Energiabilanss kütuse või energia liigi järgi. [veebileht] <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE023>
- Statistikaamet. (2017). Eesti statistika kvartalikirj, 2/2017. [veebileht] http://www.stat.ee/valjaanne-2017_eesti-statistika-kvartalikirj-2-17
- *Swedish Forest Agency. (2008). Recommendations for logging residues harvest and wood-ash recycling (Rekommendationer vid uttag av avverkningsrester och askåterföring). Meddelande 2-2008. Skogsstyrelsen, Jönköping, Sweden, ISSN 1100-0295, pp 28. (in Swedish). Viidatud: **De Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S., A. Olsson, B.** (2016). Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? -*Forest Ecology and Management*. Volume 383. pp 3-16. vahendusel
- Taastuvenergia kasutamise edendamise. (2017). [veebileht] http://www.consilium.europa.eu/et/press/press-releases/2017/12/18/promoting-renewable-energy-use-council-adopts-its-position/_(13.05.2018)
- ***Taipale, R.** 1996. Kiinteiden polttoaineden ominaisuudet. (Properties of solid fuels). Jyväskylä, University of Jyväskylä, Master's thesis. pp 138. viidatud: **Alakangas, E.** (2005). Properties of wood fuels used in Finland, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05, Jyväskylä. pp 104. vahendusel.
- Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S.** 2005. Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn: TTÜ Kirjastus. lk 172.
- Veelak, S.** (2013). Raiejäätmete omaduste muutused pikaajalisel ladustamisel. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus ja maaehitusinstituut. Tartu. lk 51.

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Sander Kaasik,

Sünniaeg 03.09.1991,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Hariliku kuuse (*Picea abies* (L.) Karst.) ja kase (*Betula* spp.) raiejäätmete kui kütuse omaduste muutused ladustamisel,

mille juhendaja(d) on Allar Padari ja Risto Mitt,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(allkiri)

Tartu, 28.05.18

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)